

# **Napájecí část nízko-odběrového vestavěného zařízení pomocí termoelektrického generátoru**

Energy Module of a Low-power Embedded Device using a Thermoelectric  
Generator

**Kamil Bančík**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Prauzek, Ph.D.

Ostrava, 2021

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi získávání energie z okolí pro napájení vestavěného systému s nízkou spotřebou. Jako zdroj energie je zvolena tepelná energie. Jsou zde jmenovány základní možnosti pro získávání, přeměnu a uchování elektrické energie. Práce se především zabývá konstrukcí měřicího přípravku pro zjištění potenciálního množství energie generované z Peltierových článků. Součástí je také návrh a realizace měřicího řetězce pro zaznamenání dat z měření s použitím virtuální instrumentace a měřící karty. Tato data poskytují základní přehled a charakteristiky měřeného termoelektrického měniče. Pro potřebu přeměny a napájení vestavěného systému byl vybrán vhodný DC-DC měnič s ukládáním energie do superkondenzátoru. Následně bylo realizováno jeho zapojení pro předpokládané použití s nízkými teplotními diferenciály dle zjištěných předpokladů získané energie. Parametry tohoto měniče jsou dále ověřeny měřením s využitím laboratorního zdroje a také pomocí měřeného Peltierova článku.

## **Klíčová slova:**

TEG, TEC, Peltierův článek, Pt1000, LabVIEW, DC-DC měnič, Akumulátor, Energy Harvesting, Low-power, cDAQ, LTC3109, Superkondenzátor, National Instruments

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the possibilities, how to gain energy out of the surrounding for powering the embedded system with low-power consumption. As the source of power, thermal energy is used. In the thesis, there are listed the basic possibilities how to gain, convert and store the electrical energy. The thesis is mainly focused on the construction of the measuring device, which serves as a means for determining the potential amount of energy generated by Peltier cells. The thesis also contains the design and realization of the measuring chain, used for the recording of the measurement data with the use of the virtual instrumentation and measuring card. This data provides the basic overview and characteristics of the measured thermoelectrical converter. For the need of transformation and powering, there was chosen the suitable DC-DC converter with the ability to store the energy into the Supercapacitor. Afterward, the DC-DC converter was connected for the supposed usage with the low-temperature differential according to the discovered assumption of the gained energy. Its parameters are further verified by the measuring which is realized utilizing the laboratory power supply and measured Peltier cell.

## **Keywords:**

TEG, TEC, Peltier cell, Pt1000, LabVIEW, DC-DC converter, Battery, Energy Harvesting, Low-power, cDAQ, LTC3109, Supercapacitor, National Instruments

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl především poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Michalu Prauzkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a trpělivost při jejím vytváření. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Stankušovi, Ph.D. za cenné rady při práci v laboratoři. Děkuji také svým rodičům za jejich trpělivost a podporu během psaní této práce.

# Obsah

<b>Seznam zkratk a symbolů.....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam Tabulek .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Energy harvesting .....</b>	<b>13</b>
2.1 Energie ze solárních zdrojů.....	15
2.2 Energie z elektromagnetického spektra.....	17
2.3 Energie z mechanických měničů .....	18
2.4 Energie z tepelných měničů .....	19
<b>3 Tepelné měniče.....</b>	<b>20</b>
3.1 Seebeckův jev .....	20
3.2 Peltierův jev.....	21
3.3 Thomsonův jev .....	21
3.4 Termoelektrické články .....	22
<b>4 Peltierův článek .....</b>	<b>23</b>
<b>5 Přeměna elektrické energie.....</b>	<b>26</b>
5.1 Lineární měniče .....	27
5.2 Kapacitní měniče .....	27
5.3 Měniče s cívkou .....	28
5.4 Transformátorové měniče.....	29
<b>6 Uchovávání elektrické energie.....</b>	<b>30</b>
6.1 Akumulátory NiMH, NiCd .....	31
6.2 Akumulátory na bázi lithia.....	32
6.3 Solid-state battery .....	33
6.4 Superkondenzátory .....	34
<b>7 Porovnání IC pro energy harvesting z tepelných měničů .....</b>	<b>35</b>
7.1 STMicroelectronics SPV1050.....	35
7.2 E-PEAS AEM20940 .....	36
7.3 Maxim Integrated MAX17710 .....	38
7.4 Texas Instruments BQ25505 .....	39
7.5 Analog Devices LTC3108.....	40
7.6 Nowi NH2D0245 .....	41

7.7	Analog Devices LTC3109.....	42
<b>8</b>	<b>Testovací přípravek.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Měřicí a vyhodnocovací zařízení .....</b>	<b>46</b>
9.1	Použitý hardware .....	46
9.2	Program pro měření na testovacím přípravku .....	49
9.3	Měřený termoelektrický měnič.....	50
9.4	Měření .....	51
<b>10</b>	<b>Měřené charakteristiky .....</b>	<b>52</b>
<b>11</b>	<b>EHDB_LTC3109.....</b>	<b>55</b>
11.1	Popis měniče .....	55
11.2	Měření na měniči.....	59
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>67</b>

## Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Význam	Jednotka
<i>A</i>	Ampérmetr	
<i>C</i>	Kapacita	[F]
<i>DC</i>	Stejnoseměrný proud	
<i>DoD</i>	Hloubka vybití (Depth of Discharge)	
<i>DPS</i>	Deska plošného spoje	
<i>EHDB_LTC3109</i>	Vývojová deska sběru energie s LTC3109 (Energy Harvesting Development Board LTC3109)	
<i>EX-</i>	Budící proud čidla – záporná svorka	
<i>EX+</i>	Budící proud čidla – kladná svorka	
<i>f</i>	Frekvence	[Hz]
<i>HI</i>	Kladný pól vstupního signálu	
<i>CH0 – CH4</i>	Vstupní kanály měřicí karty NI 9219	
<i>I</i>	Proud	[A]
<i>IC</i>	Integrovaný obvod (Integrated circuit)	
<i>I<sub>LDO-HV</sub></i>	Proud LDO – vysoké napětí	[A]
<i>I<sub>LDO-LV</sub></i>	Proud LDO – nízké napětí	[A]
<i>I<sub>LDO-TYP</sub></i>	Proud LDO – typický	[A]
<i>I<sub>LDOX-MAX</sub></i>	Maximální výstupní proud LDO výstupu	[A]
<i>I<sub>MAX-HARV</sub></i>	Maximální hodnota získaného proudu	[A]
<i>I<sub>MIN</sub></i>	Minimální vstupní proud	[A]
<i>+IN</i>	Kladná svorka vstup	
<i>- IN</i>	Záporná svorka vstup	
<i>IoT</i>	Internet věcí (Internet of Things)	
<i>I<sub>VOUT2-TYP</sub></i>	Proud VOUT2 – typický	[A]
<i>I<sub>VOUT-TYP</sub></i>	Proud VOUT – typický	[A]
<i>L</i>	Indukčnost	[H]
<i>LDO</i>	Lineární regulátor napětí (Low-dropout regulator)	
<i>LO</i>	Záporný pól vstupního signálu	
<i>MCU</i>	Mikrokontrolér (Micro Controller Unit)	
<i>MGMT</i>	Management	
<i>MPPT</i>	Sledování maximálního bodu výkonu (Maximum Power Point Tracking)	
<i>NDA</i>	Dohoda o mlčenlivosti (Non-disclosure agreement)	
<i>+OUT</i>	Kladná svorka výstup	
<i>-OUT</i>	Záporná svorka výstup	
<i>P</i>	Výkon	[W]
<i>P<sub>GOOD</sub></i>	Výstupní signál dostatku energie	
<i>P<sub>MIN</sub></i>	Minimální vstupní výkon	[W]
<i>R</i>	Odpor	[Ω]
<i>RF</i>	Radiofrekvenční	
<i>R<sub>IN</sub></i>	Vstupní odpor	[Ω]
<i>R<sub>SENSE</sub>/R<sub>S</sub></i>	Měřicí odpor	[Ω]
<i>R<sub>Z</sub></i>	Zatěžovací odpor	[Ω]

<i>S</i>	Napěťový zdroj	
<i>S</i>	Spínač	
<i>SELMPP</i>	Nastavení hodnoty MPPT	
<i>T</i>	Transformátor	
<i>TEC</i>	Termoelektrický chladič (Thermoelectric cooler)	
<i>TEG</i>	Termoelektrický generátor (Thermoelectric generator)	
<i>TEG_INPUT</i>	Vstupní svorka TEG měniče	
<i>TPMS</i>	Systém sledování tlaku v pneumatikách (Tire Pressure Monitoring System)	
<i>U</i>	Napětí	[V]
<i>V</i>	Voltmetr	
<i>V<sub>AUX</sub></i>	Referenční svorka	
<i>V<sub>BATT</sub></i>	Napětí baterie	[V]
<i>V<sub>IN</sub></i>	Vstupní napětí	[V]
<i>V<sub>IN-COLD</sub></i>	Hodnota napětí studeného startu	[V]
<i>V<sub>IN-MAX</sub></i>	Maximální vstupní napětí	[V]
<i>V<sub>IN-MIN</sub></i>	Minimální vstupní napětí	[V]
<i>V<sub>LDO</sub></i>	Výstup lineárního regulátoru	
<i>V<sub>LDO</sub></i>	Napětí LDO	[V]
<i>V<sub>LDO-HV</sub></i>	Napětí LDO – vysoké napětí	[V]
<i>V<sub>LDO-LV</sub></i>	Napětí LDO – nízké napětí	[V]
<i>VOUT</i>	Výstup měniče	
<i>V<sub>OUT</sub></i>	Výstupní napětí	[V]
<i>VOUT2</i>	Výstup měniče – spínaný	
<i>VOUT2_EN</i>	Vstup ovládání sepnutí výstupu VOUT2	
<i>V<sub>PRIM-BUP</sub></i>	Napětí záložní primární baterie	[V]
<i>VS1</i>	Svorka pro volbu výstupní hodnoty napětí	
<i>VS2</i>	Svorka pro volbu výstupní hodnoty napětí	
<i>V<sub>STOR/BAT</sub></i>	Napětí uložistiště/akumulátoru	[V]
<i>VSTORE</i>	Výstupní svorka pro akumulační prvek	

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Možné zdroje energie pro energy harvesting [2] .....	13
Obrázek 2 - Základní princip funkce fotovoltaického článku [4] .....	15
Obrázek 3 - Znázornění vlivu polohy zdroje záření vůči vestavěnému systému [1] .....	16
Obrázek 4 - Množství získané energie v závislosti na vzdálenosti od zdroje [2] .....	17
Obrázek 5 - Elektrodynamický měnič ECO 200 [5] .....	18
Obrázek 6 - Způsoby namáhání piezoelementu [1] .....	18
Obrázek 7 - Termoelektrický generátor: a) typické uspořádání; b) princip [2] .....	19
Obrázek 8 - Schéma spojení vodičů z různých materiálů o různé teplotě – Seebeckův jev [7] .....	20
Obrázek 9 - Schéma Peltierův jev [7] .....	21
Obrázek 10 - Provedení termočlánků – spoje pro měřicí techniku [10] .....	22
Obrázek 11 - Vnitřní struktura Peltierova článku [11] .....	23
Obrázek 12 - Porovnání TEC (nahore) a TEG (dole) článku [11] .....	24
Obrázek 13 - Vnitřní struktura – TEG (vlevo) a TEC (vpravo) [11] .....	24
Obrázek 14 - Koncept Seiko Thermic z roku 1998 [12] .....	25
Obrázek 15 - Aplikace využívající přirozený teplotní diferenciál mezi podloží a okolním prostředím (špičkový výkon 2,7 mW) [13] .....	25
Obrázek 16 - Ventil vytápění využívající Peltierova článku – Micropelt [14] .....	25
Obrázek 17 - Topologie IC pro získávání energie z okolí: a) přímá přeměna; b) systém s akumulací; c) systém s akumulací a zálohou primárním článkem .....	26
Obrázek 18 - Příklad zapojení lineárního měniče .....	27
Obrázek 19 - Příklad invertujícího zvyšovače napětí .....	27
Obrázek 20 - Příklad snižujícího měniče .....	28
Obrázek 21 - Příklad zvyšujícího měniče .....	28
Obrázek 22 - Příklad zvyšujícího měniče s transformátorem .....	29
Obrázek 23 - Energetická hustota akumulátorů dle jejich typu [1] .....	30
Obrázek 24 - Funkce lithiových akumulátorů [17] .....	32
Obrázek 25 - Příklad Li-ion článku SLB08115L140 fy Nichicon (14 mAh $\varnothing$ 8 x 11,5 mm) [18] .....	32
Obrázek 26 - Solid-state baterie vestavěná v aplikaci snímače nitroočního tlaku [19] .....	33
Obrázek 27 - ENERCHIP™ - holý článek (vlevo) a článek v QFN 8 x 8 mm pouzdru [19] .....	33
Obrázek 28 - Typické zapojení SPV1050 [21] .....	36
Obrázek 29 - Blokový diagram AEM20940 [22] .....	37
Obrázek 30 - Blokový diagram MAX17710 [23] .....	38
Obrázek 31 - Typické zapojení s BQ25505 pro použití s TEG [24] .....	39
Obrázek 32 - Blokové schéma LTC3108 [25] .....	40
Obrázek 33 - Blokové schéma LTC3109 [26] .....	42
Obrázek 34 - Model přípravku pro měření energetické výtěžnosti z TEG .....	43
Obrázek 35 - Řez modelem a jeho komponenty .....	44
Obrázek 36 - Finální přípravek pro měření TEG – část pro měření na TEG .....	45
Obrázek 37 - Zjednodušené blokové schéma .....	46
Obrázek 38 - Pouzdro PTFC čidla NB-PTCO-154 [27] .....	47
Obrázek 39 - Detailní schéma propojení měřicího karty k měř. přípravku TEG .....	47
Obrázek 40 - Schéma zapojení měřicí zátěže (vlevo) a fyzická realizace .....	48
Obrázek 41 - Front panel měřicí aplikace v LabVIEW .....	49
Obrázek 42 - Charakteristiky článku RC12-8-01LS [28] .....	50
Obrázek 43 - Zapojení přípravku při měření TEG .....	51
Obrázek 44 - Závislost výstupního napětí na teplotním diferenciálu .....	52



Obrázek 45 - Závislost proudu TEC na $\Delta T$ [°C] .....	53
Obrázek 46 - V-A charakteristiky TEC pro $\Delta T$ [°C].....	53
Obrázek 47 - A-P charakteristiky TEC pro $\Delta T$ [°C] .....	54
Obrázek 48 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – vstupní část a měnič.....	55
Obrázek 49 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – výstupní a měřicí piny .....	56
Obrázek 50 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – výstup pro kondenzátor .....	56
Obrázek 51 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – konfigurace hod. napětí VOUT a VOUT2.....	57
Obrázek 52 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – konfigurace spínání výstupu VOUT2 .....	57
Obrázek 53 - Schéma zapojení EHDB_LTC3109 – signály – stav napájení .....	58
Obrázek 54 - Osazená DPS – strana TOP .....	58
Obrázek 55 - Schéma měřicího řetězce .....	59
Obrázek 56 - Schéma zapojení pro měření výstupních napětí a napětí uložistě .....	61
Obrázek 57 - Doba nabíjení výstupu $V_{LDO}$ .....	61
Obrázek 58 - Nabíjení jednotlivých výstupů a akumulačních prvku.....	62

## Seznam Tabulek

Tabulka 1 - Zdroje energie a jejich jednotlivé výtěžnosti [3].....	14
Tabulka 2 - Technologie a účinnost přeměny u fotovoltaických článků [1] .....	15
Tabulka 3 - Jednotlivé typy NiXX akumulátorů [16] .....	31
Tabulka 4 - Porovnání vlastností Superkondenzátoru a Li-ion akumulátoru [16].....	34
Tabulka 5 - Tabulka maximálních měřených hodnot pro jednotlivé $\Delta T$ [°C].....	54
Tabulka 6 - Možné konfigurace výstupního napětí dle propojení VS1 a VS2.....	57
Tabulka 7 - Měřené hodnoty měniče LTC3109 .....	60
Tabulka 8 - Opakované měření s reálným měničem.....	60

# 1 Úvod

V současné době se čím dál častěji setkáváme s různými vestavěnými aplikacemi sloužícími ke sběru dat. Tato potřeba vyplývá z trendu Průmyslu 4.0 a Big data, kdy je většina dnešních činností založena na vyhodnocení sledovaných parametrů objektu. Tento trend je patrný především ve zvyšování počtu koncových IoT zařízení. Ty mohou být při specifických aplikacích umístěny na nepřístupných místech.

Jako příklad můžeme uvést snímač TPMS umístěný v pneumatikách moderních osobních automobilů. Jedná se o zapouzdřené zařízení s veškerými potřebnými komponentami uvnitř. Takovýto snímač se obvykle skládá z čidla, vyhodnocovací elektroniky, modulu bezdrátové komunikace a napájecí části. Napájení obvykle tvoří primární články s omezenou životností.

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o zapouzdřené zařízení bez možnosti mechanického rozebrání a výměny zdroje energie. Toto koncové zařízení je tedy po vyčerpání energie z primárního článku nefunkční a již dále neplní svůj účel, jímž je měření a odesílání měřených hodnot. Neexistuje možnost jednoduchého mechanického rozebrání a výměny baterie či dobití vestavěného akumulátoru. Zařízení je tedy po vyčerpání energie vyhozeno. Z ekonomického hlediska se nemusí vyplatit toto zařízení repasovat a uvádět znovu do provozu. Vlastník těchto zařízení s největší pravděpodobností použije nové. Původní zařízení odevzdá k ekologické likvidaci. Zde dochází k třídění, separaci a recyklaci. Ekonomická výtěžnost z tohoto procesu je ale nižší, než kdyby zařízení nadále plnilo svou činnost, a to bez potřeby výměny elektrického zdroje.

Elektronika snímače je obvykle funkční a mohla by ještě řadu dalších let sloužit. Místo toho je zbytečně vyhozena. Základní otázkou tedy je, jak se vyhnout použití primárních článku a prodloužit životnost těchto zařízení.

Jednou z možností, jak zmírnit ekologické a ekonomické dopady je energy harvesting, tedy získávání a využívání okolní energie. Tou může být energie elektromagnetického spektra (světlo, RF), mechanická a tepelná [1].

Práce se ve své teoretické části zaměřuje na přehled možných využitelných energetických zdrojů. Hluběji se zaměřuje na využití tepelné energie pro napájení vestavěných nízko-odběrových zařízení s využitím termoelektrických měničů, zejména pak na aplikaci Peltierova článku.

Jsou zde uvedeny jednotlivé provedení DC-DC měničů, pro přeměnu získané elektrické energie na vyšší napětíovou úroveň, využitelnou pro napájení a provoz MCU a jeho periférií. Dále jsou stručně popsány možné akumulační prvky elektrické energie. Toto se týká především zajištění bezpečného provozu i v době, kdy není přítomný zdroj ambientní energie nebo je potřeba spuštění energeticky náročné aplikace.

V rámci teoretické části byla také provedena rešerše konkrétních integrovaných obvodů dostupných pro využití s termoelektrickými měniči.

Praktická část práce se především zaměřuje na experimentální ověření výtěžnosti termoelektrického měniče, a to konkrétně Peltierova článku, při získávání energie z malých teplotních diferenciálů. Pro potřeby tohoto měření byl sestaven měřicí přípravek a vytvořen program pro záznam

měřených hodnot na přípravku. Tyto data jsou posléze dále zpracována a použita pro vyhodnocení funkčnosti navrženého řešení a evaluaci potenciální energetické bilance měniče.

Pro potřeby napájení vestavěné aplikace byl také vytvořen elektronický modul postavený na vybraném integrovaném modulu LTC3109, který integruje všechny potřebné části pro získání, přeměnu a uchování elektrické energie. Dle měřených hodnot z předchozí části byla verifikována možnost napájet vestavěné zařízení z termoelektrického měniče.

## 2 Energy harvesting

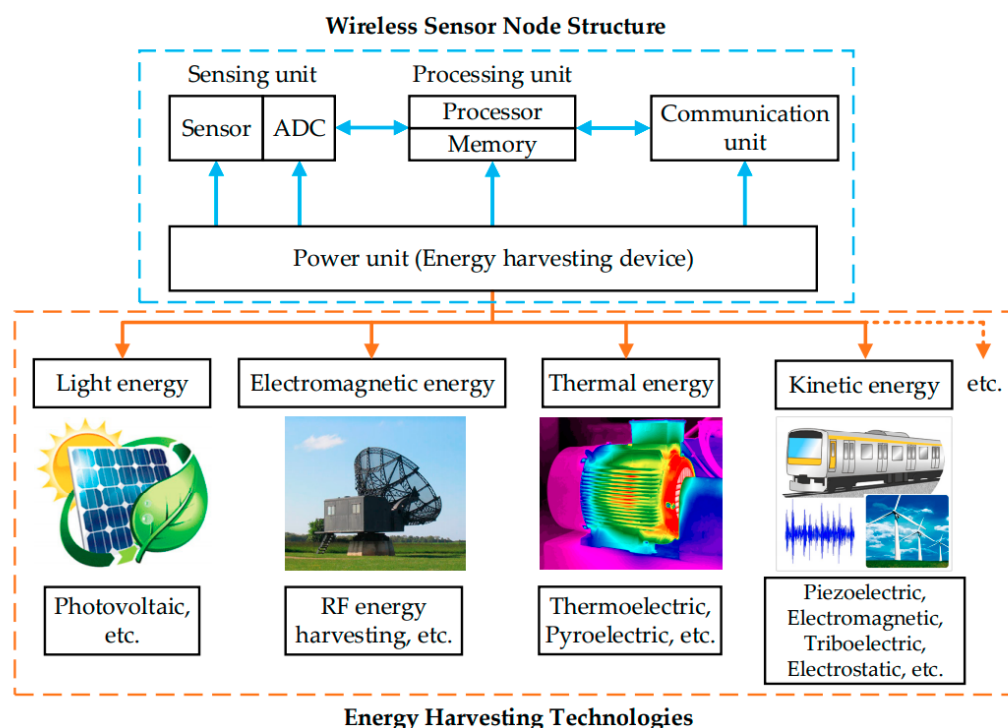
V tradičních situacích používáme pro napájení vestavěných systémů primárních chemických článků, akumulátorů nebo u energeticky náročných aplikací elektrickou energii z distribuční sítě. Tyto zdroje nejsou vždy nejlepší volbou.

V případě chemických článků se jedná především o jejich degradaci. U primárních chemických článků dochází k degradaci elektrolytu nebo obsažených chemických sloučenin. U akumulátorů dochází k degradaci vnitřních struktur, na elektrodách se objevují chemické vrstvy zvyšující odpor či jiné nežádoucí jevy [1]. Tímto klesá jejich potenciální kapacita a je nutné je po vyčerpání energie či degradaci vnitřních struktur vyměnit. To vyžaduje obvykle fyzický zásah do zařízení. Toho ale není u některých vestavěných aplikacích možné dosáhnout.

Jedná se především o zařízení, které jsou vestavěné do prostorů, kde není umožněn přístup. Případně by tato výměna zapříčinila destrukci zařízení nebo objektu, kde je zařízení instalováno. Můžeme zmínit například aplikace zabudované do stavebních konstrukcí (do betonu, do živcových pokládek na silnici, podvodní aplikace).

V úvodu byl zmíněn jako příklad snímač TPMS. V jeho případě by právě výměna znamenala fyzické rozebrání, které ale není jednoduše proveditelné.

U energy harvesting se využívá získávání energie z prostředí. V tomto prostředí je nutné nalézt energetický zdroj, který je možné předem charakterizovat, je zde přítomný nebo se jeho přítomnost periodicky opakuje a umožňuje získat dostatek energie pro provoz dané aplikace [1]. Tyto zdroje mohou být tepelné, mechanické nebo z elektromagnetického spektra [2].



Obrázek 1 - Možné zdroje energie pro energy harvesting [2]

V následující tabulce jsou vypsané jednotlivé běžně přítomné zdroje v okolí, ze kterých je možné energii získat. Jak je možné vidět, rozpětí získaného množství energie je mezi jednotlivými zdroji různé.

Tabulka 1 - Zdroje energie a jejich jednotlivé výtěžnosti [3]

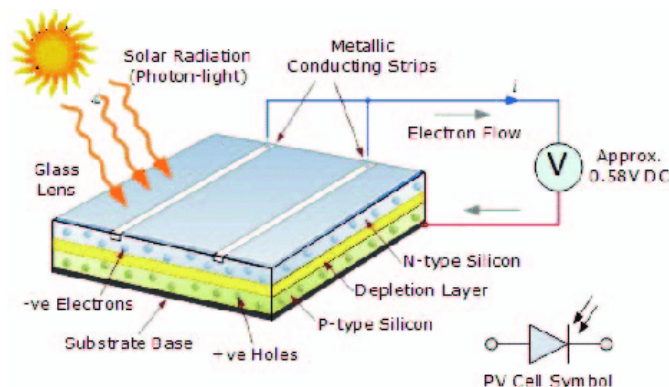
Zdroj energie		Charakteristika zdroje	Účinnost přeměny	Získaná energie
Světlo	v budovách	0,1 mW/cm <sup>2</sup>	10–24 %	10 μW/cm <sup>2</sup>
	venkovní	100 mW/cm <sup>2</sup>		10 mW/cm <sup>2</sup>
Teplo	člověk	20 mW/cm <sup>2</sup>	0,1 %	25 μW/cm <sup>2</sup>
	stroj	100 mW/cm <sup>2</sup>	3 %	1–10 mW/cm <sup>2</sup>
RF	900 MHz	0,3 μW/cm <sup>2</sup>	50 %	0,1 μW/cm <sup>2</sup>
	1800 MHz	0,1 μW/cm <sup>2</sup>		
Vibrace	člověk	0,5 m–1 Hz 1 m/s <sup>2</sup> - 50 Hz	Závislá na zdroji	4 μW/cm <sup>2</sup>
	stroj	1 m–5 Hz 10 m/s <sup>2</sup> - 1 kHz		100 μW/cm <sup>2</sup>

Největšího množství energie je možné získat ze světla a tepla. Nejčastěji používaným zdrojem je ale právě světlo. Jedná se především o ekonomické hledisko. Tyto zdroje obvykle poskytují již dosti vysokou amplitudu napětí, která je snáze transformovatelná na vyšší hodnotu napětí. U tepelných měničů aplikovaných na malý zdroj tepelné energie je problém s malou amplitudou elektrického napětí [1]. Následně je potřeba použít DC-DC měničů s velkým transformačním poměrem [1]. Zde dochází k nezanedbatelným ztrátám v řádech desítek procent.

Jako méně používané, lze označit zdroje radiofrekvenční a vibrační. Množství potenciálně získané energie je, i přes vysokou účinnost přeměny, malé a hůře aplikovatelné u energeticky náročnějších systémů. U vibračních zdrojů se také vyskytuje problém, že jsou schopny získávat energii s největší účinností ze zdroje s frekvencí, na kterou jsou laděny [1]. Jejich použití je tedy silně omezeno na stroje, které generují vibrace o určité frekvenci [1]. Ta musí být, pokud možno neměnná [1].

## 2.1 Energie ze solárních zdrojů

Jedná se o často využívaný zdroj energie převážně u aplikací ve venkovním prostředí. Pro provoz zařízení je využíváno energie ze světla. V okolním prostředí je v denní dobu přítomný přirozený zdroj energie – slunce. energii můžeme získávat přímou přeměnou přijímaných fotonů pomocí fotovoltaických článků. Další alternativou je využití tepelné radiace k ohřevu tělesa a následná přeměna tepelné energie na elektrickou.



Obrázek 2 - Základní princip funkce fotovoltaického článku [4]

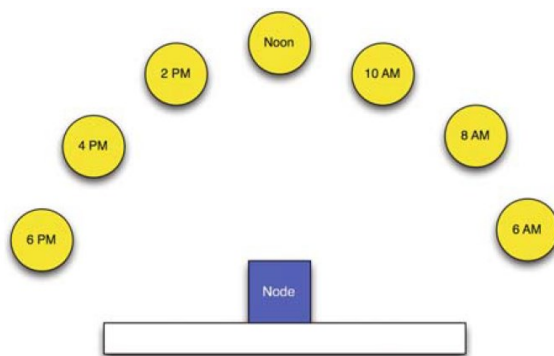
Při maximálním slunečním svitu lze z  $1 \text{ cm}^2$  teoreticky získat až 100 mW. Reálná účinnost dnes vyráběných fotovoltaických článků se obvykle pohybuje v rozmezí 5–35 % (zdroj fotonů je kolmo k ploše článku), a to v závislosti na konstrukci a chemickém složení substrátu článku [1]. Jako výchozí prvek je obvykle používán křemík s dotací jiných prvků [2].

Napětí naprázdno se pro jeden článek pohybuje obvykle blízko hodnoty 630 mV [3]. Kombinací článků do série, případně paralelně, lze dosáhnout požadovaného výstupního napětí. Z praktického hlediska je tedy výtěžnost z  $1 \text{ cm}^2$  článku v rozpětí 5–35 mW [1].

Tabulka 2 - Technologie a účinnost přeměny u fotovoltaických článků [1]

Technologie článků	Nejlepší zaznamenaná účinnost přeměny energie [%]
Amorfní Si	11
Polykrystalický Si	18
Single-crystal Si	25
Grätzel cell	11
Organické	5
CdTe	15
CIGS (Cu; In; Ga; Se)	19
Multi - gap (In; Ga; P; As; Ge)	35

Nevýhodu těchto řešení je závislost na okolních vlivech, které jsou jen těžko předvídatelné. Zde můžeme zmínit především stíny způsobené změnami v atmosféře (oblačnost, déšť a jiné jevy). Při umístění je také nutné zohlednit pohyb slunce vůči danému měniči, a to z hlediska úhlu dopadu paprsků na plochu měniče. Při nevhodném umístění v zástavbě a orientaci vůči slunci, dochází k výrazným poklesům získané energie [1]. Příčinou je především stín okolních staveb a vegetace v průběhu dne.



Obrázek 3 - Znázornění vlivu polohy zdroje záření vůči vestavěnému systému [1]

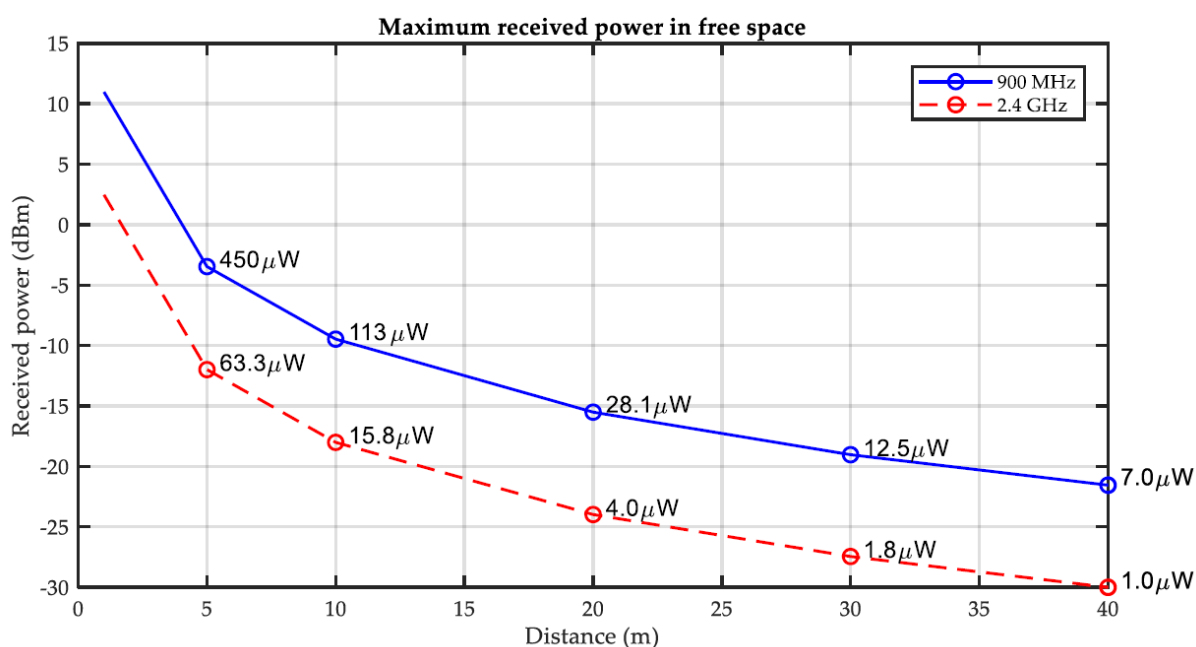


## 2.2 Energie z elektromagnetického spektra

Energie z elektromagnetického spektra je obvykle získávána z rádiových vln. Frekvence, ze kterých lze získat energii, se vyskytují ve frekvenčním pásmu od 3 kHz až po 300 GHz [2]. Nespornou výhodou je možnost využití v prostorech, kde nejsou přítomné žádné z dříve jmenovaných zdrojů [1]. Postačuje pouze přítomnost rádiového signálu.

Systém pro získávání energie se skládá z antény, frekvenčně přizpůsobené přijímanému signálu, impedančně přizpůsobeného obvodu a DC-DC měniče [2]. Potřebný transformační poměr je vysoký, a to vzhledem k napěťovým amplitudám získané energie.

Nevýhodou RF zdrojů je závislost na vzdálenosti od zdroje, kdy generovaná energie kvadraticky klesá se vzdáleností od vysílače [2]. Problémem jsou také překážky mezi vysílačem a přijímačem, které výrazně omezují množství získané energie. Totéž platí o atmosférických změnách v prostředí.

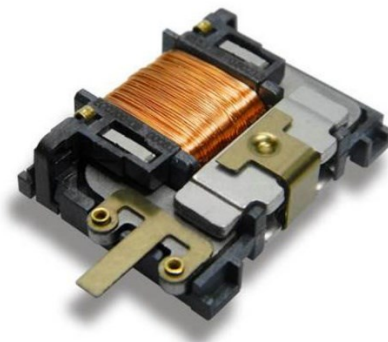


Obrázek 4 - Množství získané energie v závislosti na vzdálenosti od zdroje [2]

## 2.3 Energie z mechanických měničů

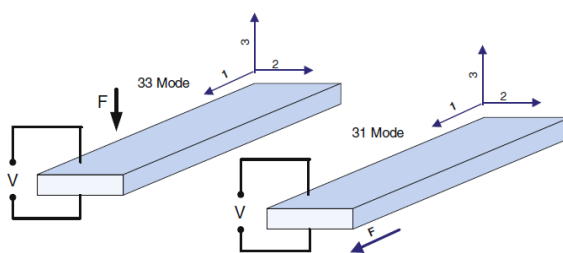
Měniče pro přeměnu mechanické energie můžeme rozdělit dle principu získávání elektrické energie na: indukční, piezoelektrické a kapacitní.

**Indukční** – Vycházejí z principu vzájemného oscilačního nebo rotačního pohybu vodiče magnetickým polem [1]. Při pohybu cívky magnetickým polem dochází k indukci elektrického napětí. Jedná se o metodu, která se používá ve většině průmyslových aplikací ke generování výkonů od zanedbatelných množství energie až po stovky megawattů.



Obrázek 5 - Elektrodynamický měnič ECO 200 [5]

**Piezoelektrický** – Při deformaci piezoelementu dochází ke generování elektrické energie. Používá se především pro získávání elektrické energie z vibrací, vzhledem k malému rozsahu povolené deformace mechanické struktury. Vzniklá amplituda napětí při správném naladění oscilátoru může dosahovat jednotek až desítek voltů [1].



Obrázek 6 - Způsoby namáhání piezoelementu [1]

**Kapacitní** – Při změně vzdálenosti mezi elektrodami nabitého kondenzátoru dochází ke snížení kapacity, které je ale doprovázeno zvýšením napětí [1]. Tento typ se používá především u mikromechanických struktur, kde je možné dosáhnout tohoto kmitání elektrod [2]. Použití této metody je nákladné.

U většiny zmíněných elektromechanických měničů musí dojít k usměrnění výstupního proudu pomocí usměrňovače a následně ke zvýšení amplitudy napětí pomocí DC-DC měniče.

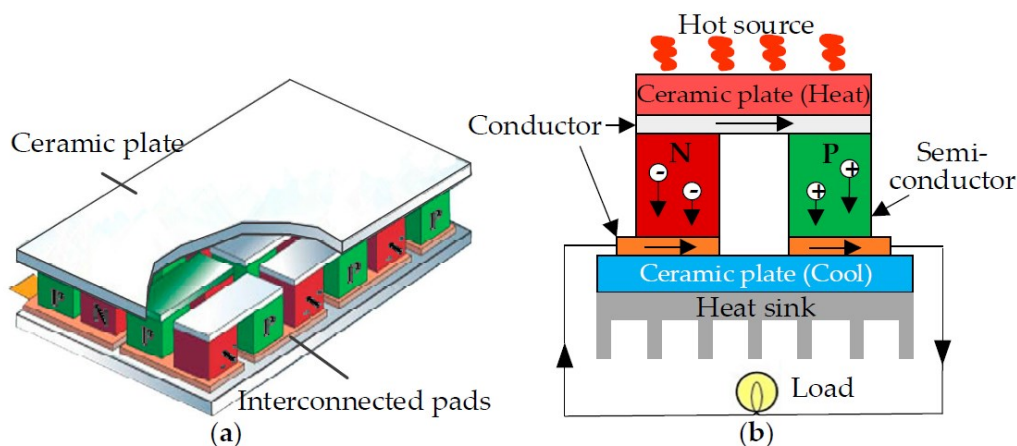
## 2.4 Energie z tepelných měničů

Při získávání energie z tepelných zdrojů je využíváno zdrojů tepla, které se přirozeně vyskytují v přírodě. V případě použití v průmyslu lze využít tepla z provozu zařízení či technologií, které toto teplo generují jako odpad.

Množství takto získané energie je závislé na dostupném tepelném toku a velikosti teplotního gradientu. Čím je vyšší teplotní gradient nebo tepelný tok, tím více je možné získat energie z tepelného měniče. Výhodou získávání tepelné energie je, že lze využívat přirozených teplotních gradientů okolí. Může se jednat například o střídání dne a noci, teploty živichných pokládek a jejich podloží nebo teplotního rozdílu mezi zemínou a vzduchem.

Energie těchto přechodných dějů, které se periodicky opakují, může být navíc uchována pomocí „PCM – phase change material“ [6]. Tento materiál při své fázové přeměně uvolňuje/absorbuje energii a ta může být posléze využita. Energii pro přeměnu je tedy možné lépe rozložit v potřebném časovém horizontu.

Pro potřeby získávání energie se využívá přímé přeměny tepelné energie na energii elektrickou. Děje se tomu tak v Peltierových člancích nebo termočláncích na základě Seebeckova a Peltierova jevu.



Obrázek 7 - Termoelektrický generátor: a) typické uspořádání; b) princip [2]

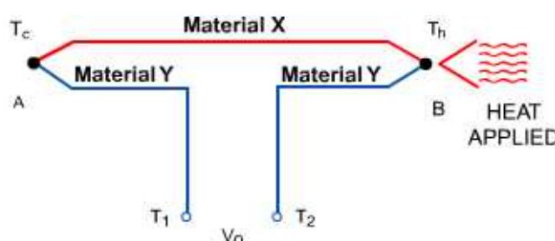
### 3 Tepelné měniče

Pro získávání energie z tepelných zdrojů se využívá především Seebeckova a Peltierova jevu. Ty jsou níže podrobně popsány včetně ostatních fyzikálních jevů, které souvisí s termoelektrickými měniči. Jako materiály jsou obvykle používány polovodiče vzhledem k vyšší výtěžnosti a vhodným hodnotám Seebeckova napětí. S kovy se lze setkat především u aplikací, které se zabývají vyhodnocováním teploty (termočlánky), kde není kladen důraz na množství získané energie z termoelektrického měniče.

#### 3.1 Seebeckův jev

Thomas Johann Seebeck při svých výzkumech v letech 1821-1823 náhodně objevil, že při styku dvou kovů, kdy styčné plochy mají různou teplotu, dochází ke vzniku malého elektromotorického napětí [7][8]. Toto elektromotorické napětí je přímo úměrné spádu teploty mezi jednotlivými styčnými plochami materiálu. Tohoto jevu se využívá hlavně při snímání teplot – termočlánky [7].

Na následujícím obrázku jsou znázorněny vodiče X a Y z dvou různých materiálů. Konce těchto vodičů jsou spojeny v bodech A a B. V případě, že bude rozdílná teplota těchto dvou konců –  $T_c < T_h$ , vytvoří se mezi svorkami  $T_1$  a  $T_2$  elektromotorické napětí [8]. Toto platí i v opačném smyslu.



Obrázek 8 - Schéma spojení vodičů z různých materiálů o různé teplotě – Seebeckův jev [7]

Velikost elektromotorického napětí je určena vztahem:

$$V_0 = \alpha_{XY} \cdot (T_h - T_c) \quad (1)$$

kde:

$V_0$  Generované elektromotorické napětí [V]

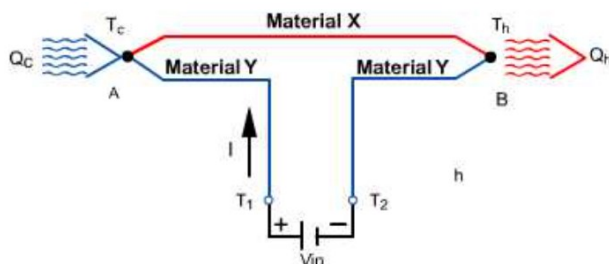
$\alpha_{XY}$  Seebeckův koeficient mezi materiály [V/°K]

$T_h, T_c$  Teploty teplého a studeného spoje [°K]

Hodnota Seebeckova koeficientu je nelineární, pro nízké hodnoty teplotních diferencíálů ji lze linearizovat do níže uvedené podoby. Hodnoty Seebeckova koeficientu se pohybují v řádech  $10^{-6} - 10^{-5} \frac{V}{^\circ K}$  pro kovy a  $10^{-5} - 10^{-3} \frac{V}{^\circ K}$  pro polovodiče [8].

### 3.2 Peltierův jev

Byl objeven v roce 1834 Jean Charles Athanase Peltierem. Jedná se o opačný jev k jevu Seebeckovu. Průchodem elektrického proudu spoji A a B dojde v závislosti na směru proudu na jednom spoji – A k ochlazování (absorpce tepla) a u druhého spoje – B k zahřívání (vyzařování tepla) [7]. Vzniklý teplotní diferenciál mezi konci je úměrný Peltierovým koeficientům. Zahříváním jednoho spoje a ochlazováním druhého lze tedy v uzavřeném elektrickém obvodu energii generovat [7].



Obrázek 9 - Schéma Peltierův jev [7]

Tepelná energie  $Q_c$  absorbovaná/ $Q_h$  emitována do prostředí z [7] (upraveno):

$$Q_x = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I \quad (2)$$

kde:

$Q_x$	tepelná energie emitovaná/absorbovaná [W]
$\Pi_A, \Pi_B$	Peltierovy koeficienty $[J \cdot A^{-1}]$
$I$	Elektrický proud tekoucí vodičem [A]

### 3.3 Thomsonův jev

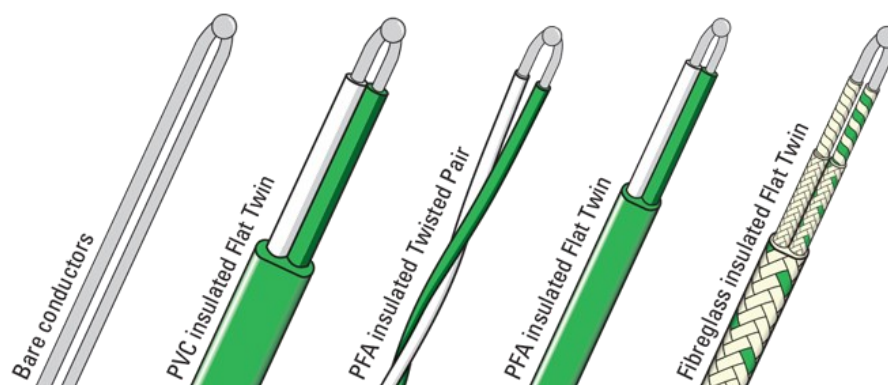
Byl objeven v roce 1851 Williamem Thompsonem. Tento jev spočívá v zahřívání jednoho konce kovové tyče o délce  $l$  za vzniku teplotního spádu/teplotního gradientu mezi jednotlivými konci vodiče [9]. Ve své podstatě je tedy podobný Seebeckovu jevu, nepotřebuje ale spojení dvou kovů. Pro potřeby získávání energie hraje tento jev zanedbatelnou roli.

### 3.4 Termoelektrické články

Termoelektrické články fungují na principu Seebeckova jevu. Obvykle se jedná o kontaktní spojení dvou různých kovů. Při vystavení tohoto spoje teplu je generováno napětí o nízké amplitudě v řádech  $\mu\text{V}$  –  $\text{mV}$ . Jejich nejčastější využití je ve snímací technice.

Vyrábí se v různých provedeních a zapouzdřeních. Jejich výhodou je nízká cena, vysoká přesnost a velký teplotní rozsah. Nevýhodou je, že délka měřících vodičů musí být co nejkratší z důvodu jejich vlastního odporu.

Jejich spojením lze dosáhnout mnohem vyšších výstupních napětí. Toto spojení se používá u Peltierových článků.



Obrázek 10 - Provedení termočlánků – spoje pro měřící techniku [10]

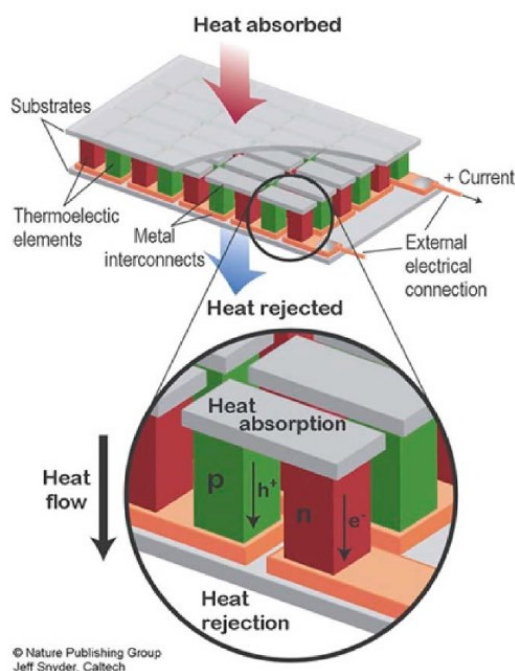
## 4 Peltierův článek

Peltierův článek zakládá na výše jmenovaných fyzikálních principech, a to především na Seebeckovu (TEG) a Peltierovu jevu (TEC). Peltierovy články se obvykle skládají z polovodičů typu P a N spojených pomocí vodivých přemostění.

Nejčastěji používaným polovodičem je spojení telluridu bismutitého ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) [11] a spojovacích propojek z mědi. Celá baterie termočlánků je umístěna na nevodivém keramickém substrátu obvykle čtvercového tvaru. Substrátem je nejčastěji deska oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [11].

Přivedením elektrického proudu na polovodič dojde na jedné straně k čerpání tepla. Na druhé straně je toto teplo předáváno okolí. S oblibou se tedy používají tyto články pro chlazení komponent náročných na konstantní teplotu. V případě, že je Peltierův článek vystaven na svých stranách teplu a chladu, dochází ke generování napětí. To je závislé na tepelném toku a teplotním diferenciálu [1].

Jednotlivé spojení P a N polovodičů nedosahují velkého výstupního napětí. Proto jsou jednotlivé spojení následně propojeny v sérii, která tvoří termoelektrickou baterii. Ta je již schopna dodávat dostatek energie vhodné pro další přeměnu v DC-DC měniči.



Obrázek 11 - Vnitřní struktura Peltierova článku [11]

Tyto články se dělí dle použití na:

**TEG – Thermoelectric generator** – Peltierovy články určené pro generování elektrické energie

**TEC – Thermoelectric cooler** – Peltierovy články určené pro chlazení

Z hlediska generování energie pro takto malé teplotní gradienty mezi nimi není rozdíl. Zásadním benefitem TEG je použití pájek s vyšším bodem tání, větší mezera mezi keramickými vrstvami a obvykle i chybějící silikonová izolace po obvodu článku [11]. Výsledkem je právě větší vedení tepla mezi teplou a studenou stranou článku jednotlivými řezy polovodiče. Pro aplikace, kde se dosahuje vysokých teplotních diferencíálů, je tedy vhodné používat články TEG [11]. Pro potřeby získávání energie z nízkých teplotních gradientů toto není nutné a lze použít článků TEC [11].

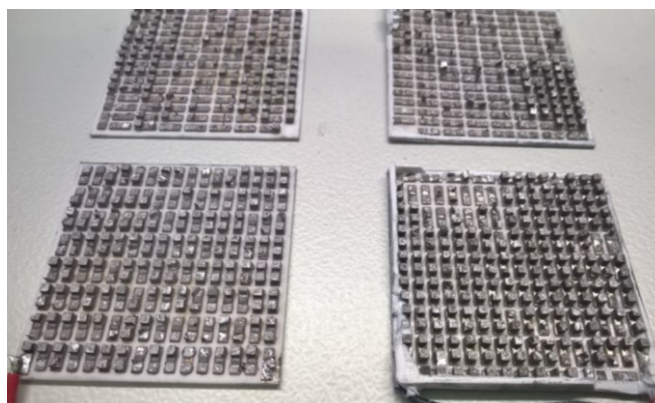
Výhodou použití článků TEC je především cena v řádech 100–1000 Kč a široká dostupnost. Výsledná aplikace s TEC měničem může být výrazně levnější než použití článků TEG.

Níže je možné vidět jednotlivé fyzické rozdíly mezi články TEG a TEC. Rozdíl mezi vyobrazenými články je pouze minimální. Použití izolačního silikonu bylo již zmíněno. U TEG článků je také možné setkat se s nepatrně vyššími řezy polovodičů.

Rozdíl může být také v chemickém složení polovodiče. To má přímý vliv na hodnotu Seebeckova koeficientu, který je vyšší. Dochází tedy k žádanému zvýšení výstupního napětí měniče.



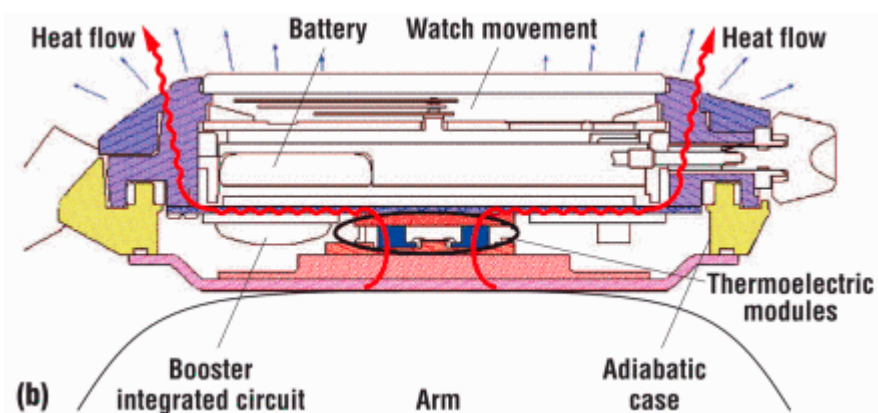
Obrázek 12 - Porovnání TEC (nahore) a TEG (dole) článku [11]



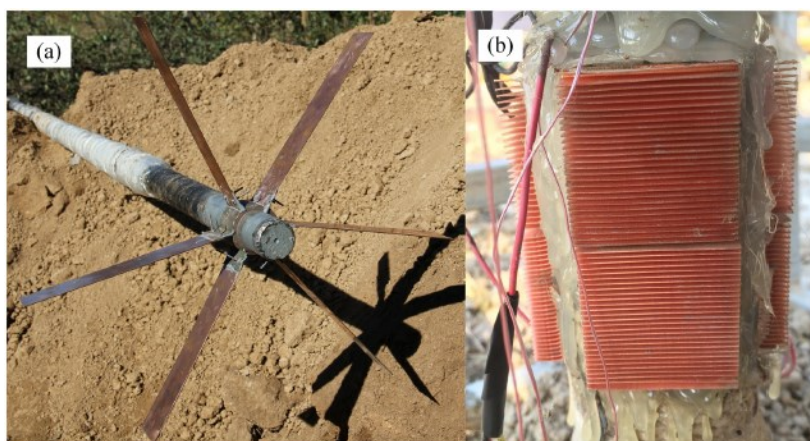
Obrázek 13 - Vnitřní struktura – TEG (vlevo) a TEC (vpravo) [11]



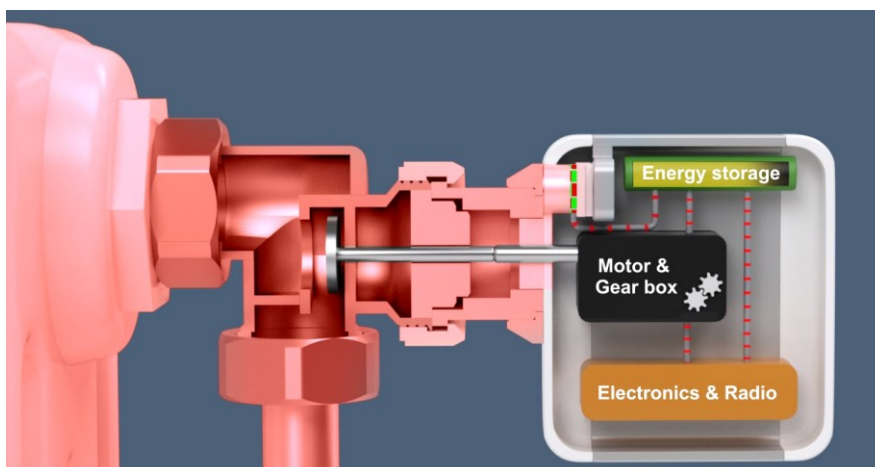
Peltierovy články se dnes již běžně používají v komerční elektronice jako zdroj energie. Jedním z příkladů může být koncept hodinek napájených termoelektrickým měničem. Jednodenní nošení na zápěstí je schopné generovat dostatek elektrické energie pro provoz mikrokontroléru hodinek na následujících 40 dní [12].



Obrázek 14 - Koncept Seiko Thermic z roku 1998 [12]



Obrázek 15 - Aplikace využívající přirozený teplotní diferencíál mezi podloží a okolním prostředím (špičkový výkon 2,7 mW) [13]



Obrázek 16 - Ventil vytápění využívající Peltierova článku – Micropelt [14]

## 5 Přeměna elektrické energie

Pro potřebu zajištění provozu vestavěného zařízení je potřeba energii z termoelektrického měniče, vzhledem k nízkým hodnotám amplitudy v řádech desítek až stovek mV, transformovat na vhodné napěťové hladiny. Ty je dále možno použít pro napájení samotného MCU a jeho periférií jako bezdrátových komunikačních modulů, snímačů apod.

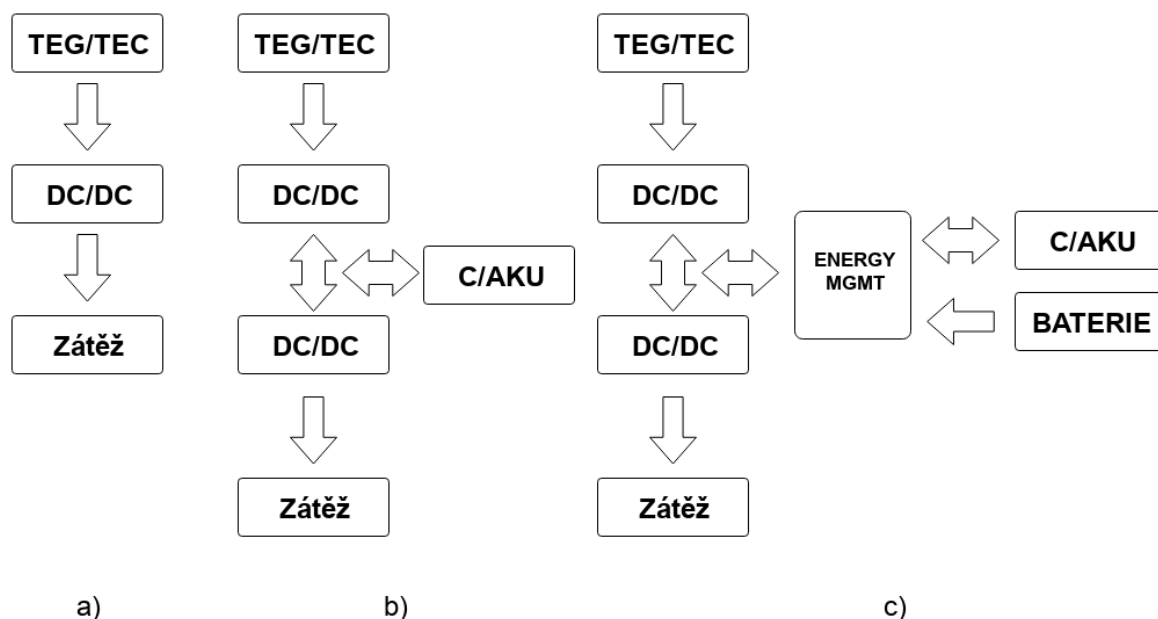
Výstupní napětí termoelektrických měničů je stejnosměrné. V této kapitole se tedy jedná o DC-DC měniče. Je potřeba také brát v potaz smysl teplotního toku termoelektrickým měničem, a to z důvodu případné změny smyslu výstupního napětí.

U vybraného měniče v praktické části je obrácení polarity řešeno tak, že je vstupní oscilační obvod integrovaného obvodu zdvojený a připojený v opačném smyslu polarity vstupního napětí. Je tedy schopen pracovat s napětím o obou polaritách.

Měniče můžeme rozdělit na dvě kategorie, a to z hlediska použití v obvodu pro získávání energie z okolí [1]:

**Měniče vstupní** – sloužící k získání vhodné hladiny napětí pro další přeměnu a uchování energie

**Měniče výstupní** – sloužící pro přeměnu energie na požadované výstupní hladiny



Obrázek 17 - Topologie IC pro získávání energie z okolí:

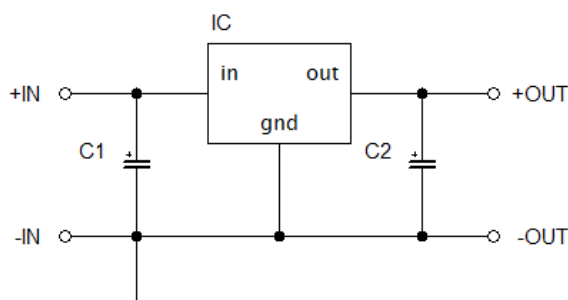
a) přímá přeměna; b) systém s akumulací; c) systém s akumulací a zálohou primárním článkem

V následujících kapitolách jsou jmenovány jednotlivé měniče, které jsou využívány v řetězci přeměny energie z termoelektrického měniče (zdroje) do zátěže (MCU, snímače, komunikace).

## 5.1 Lineární měniče

Pro energy harvesting jako takový jsou lineární měniče nevhodné, jelikož nejsou schopné úroveň napětí zvyšovat. Hrají ale nezastupitelnou roli ve výstupní části. Jsou koncipovány ke snižování napětí. Rozdíl mezi vstupní hodnotou a výstupní hodnotou musí být, pokud možno co nejmenší, a to z toho důvodu, že přebytečná energie je měněna na teplo. Účinnost těchto měničů je tedy velmi nízká.

Výhodou těchto měničů je ale nízký výstupní šum a zvlnění [15]. Konstrukce nevyžaduje obvykle dalších komponent a je tedy finančně nenáročná. Výstup a vstup měniče může být opatřen vhodným kondenzátorem.



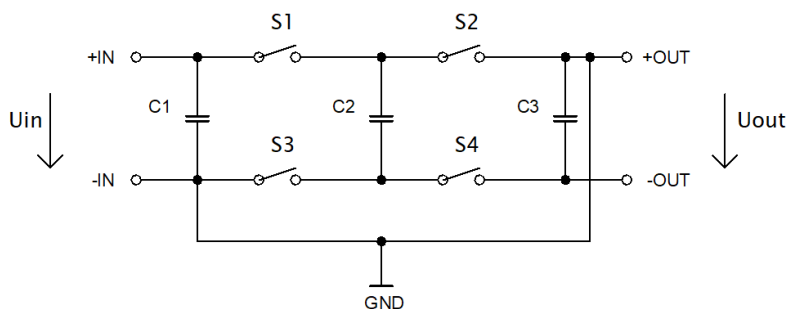
Obrázek 18 - Příklad zapojení lineárního měniče

## 5.2 Kapacitní měniče

Nábojové pumpy využívají pro svou funkci keramických nebo elektrolytických kondenzátorů. Vhodným spínáním a nabíjením jednotlivých kondenzátorů lze posléze docílit požadované hodnoty napětí.

Princip spočívá ve vhodném přepínání polovodičových spínacích prvků  $S_{1-4}$  a postupném nabíjení jednotlivých kondenzátorů  $C_{1-3}$ . Po nabití dochází k přepnutí spínačů do stavu, kdy jsou jednotlivé kondenzátory v sériovém zapojení a dochází k sečtení napěťových příspěvků. V případě snižovačů napětí dochází nejdříve k nabití všech kondenzátorů v sérii. Následně dochází k přepnutí polovodičových spínacích prvků do stavu, kdy jsou jednotlivé kondenzátory zapojeny vůči sobě paralelně. Přepínání probíhá při vysoké frekvenci v řádech 10–2000 kHz.

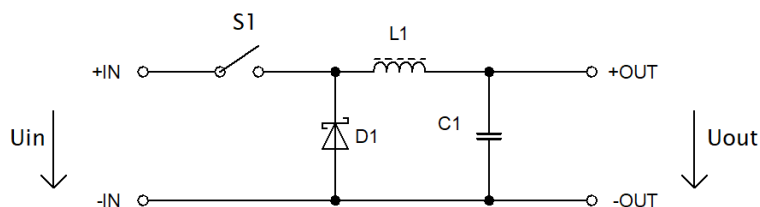
Nevýhodou těchto měničů je nízká proudová zatížitelnost a nízká účinnost. Zvyšování a snižování napětí je úměrné počtu použitých kondenzátorů [15].



Obrázek 19 - Příklad invertujícího zvyšovače napětí

## 5.3 Měniče s cívkou

U snižujících obvodu dochází k periodickému spínání polovodičového spínače  $S_1$ , při kterém dochází k přeměně elektrické energie v tlumivce  $L_1$ . Po rozeznutí se snaží tlumivka udržet směr proudu a dochází k dobíjení výstupního kondenzátoru  $C_1$ . Změnou střídy spínání je ovlivněna velikost výstupního napětí.

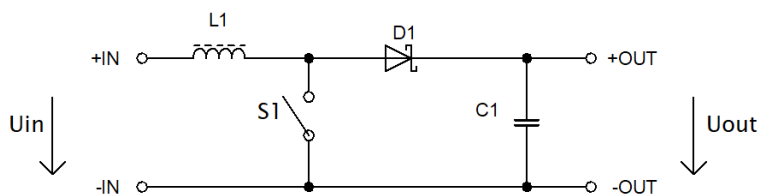


Obrázek 20 - Příklad snižujícího měniče

U zvyšovače napětí dochází k akumulaci elektrické energie v magnetickém poli tlumivky  $L_1$  a zároveň vybíjení kondenzátoru  $C_1$  do výstupní zátěže. Za tlumivku je řazena polovodičová dioda tak, aby nedocházelo k vybíjení přes spínač  $S_1$ . Po rozeznutí spínacího prvku  $S_1$  se tlumivka chová jako proudový zdroj.

Napětí dodávané na výstup je rovno součtu napětí ze zdroje a napětí indukovaném na tlumivce [15]. Takto dochází ke zvyšování napětí na žádanou hodnotu. Změnou střídy může být napětí regulováno. Výstupní napětí je vždy vyšší než napětí vstupní. Pro řízení se používá spínacích frekvencí v řádech 10-1000 kHz.

Výhodou těchto zdrojů je jejich jednoduchost a nízká cena. Nevýhodou je ale velké zvlnění výstupního napětí, a to z toho důvodu, že při spínání indukčnosti dochází k napěťovým špičkám a superponování rušení. Pro odrušení je potřeba na výstupu používat velkých kapacit [15].

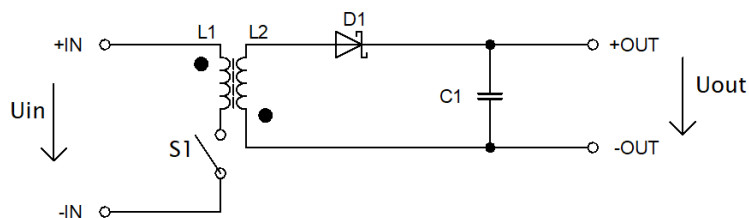


Obrázek 21 - Příklad zvyšujícího měniče

## 5.4 Transformátorové měniče

U transformátorových měničů se využívá magnetického obvodu, tvořeného dvěma magneticky spřaženými cívkami  $L_1$  a  $L_2$ . Přivedením vstupního napětí na primární cívku začne tlumivkou  $L_1$  téct proud. Ten se postupně zvyšuje a dochází k akumulaci energie v magnetickém jádru. Po odpojení primárního obvodu od zdroje dochází ke skokové změně polarity indukovaného napětí na primární cívce.

Na sekundární cívce je jev totožný a vinutím  $L_2$  protéká proud v propustném směru polovodičové diody  $D_1$ . Tento proud teče do zátěže a dochází k nabíjení kondenzátoru  $C_1$ . Tento jev se periodicky opakuje s novým sepnutím spínače. Ten je spínán zdrojem periodického signálu o frekvenci v řádech 10-100 kHz [15]. Velikost střídavy ovlivňuje výstupní napětí – při nižší než 50 % dochází ke snižování amplitudy napětí.



Obrázek 22 - Příklad zvyšujícího měniče s transformátorem

## 6 Uchovávání elektrické energie

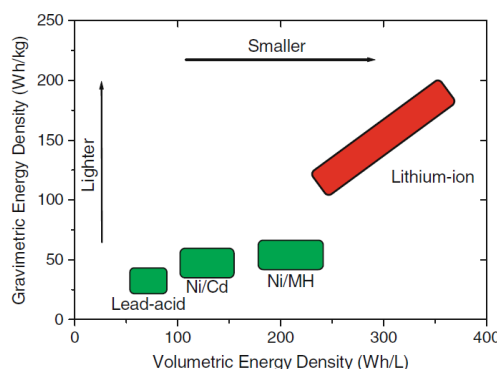
Možností, jak uchovat získanou elektrickou energii je mnoho. Primárně lze nejpoužívanější prvky rozdělit na elektrochemické a elektrostatické akumulční prvky.

Elektrochemické zdroje by bylo dále možné rozdělit na primární a sekundární články. Rozdílem mezi nimi je, že sekundární články lze opětovně nabíjet.

V případě uchování energie získané z okolí se můžeme nejčastěji setkat s kondenzátory a superkondenzátory. Jedná se obvykle o elektrostatické akumulční prvky. Hlavním důvodem je také to, že nemusí docházet k přeměně elektrické energie na jinou formu energie např. chemickou.

Další metodou je možnost přeměny elektrické energie na chemickou. Tohoto jevu se využívá u sekundárních článků neboli akumulátorů. Tento děj je reverzibilní. Lze tedy do akumulátoru uložit energii elektrickou do formy chemické a tu zpětně transformovat na elektrickou.

Chemické energie je využíváno i u primárních článků. Zde je energie vázána do chemické formy a lze získat energii elektrickou. Již ale není možné energii do primární baterie dobít. Jedná se tedy pouze o záložní řešení napájení bez možnosti ukládání energie.



Obrázek 23 - Energetická hustota akumulátorů dle jejich typu [1]

Samotný výběr vhodného akumulčního prvku závisí na mnoha faktorech. Jedním z hlavních faktorů je především schopnost pokrytí příkonových špiček způsobených např. rádiovým modulem. Svou roli hraje také zamýšlená životnost, spotřeba zařízení a potenciální množství získané energie.

Pro dosažení požadovaných charakteristik je vhodné nespoletat pouze na jeden akumulční prvek, ale využít jejich kombinace. Jako příklad lze uvést kombinaci superkondenzátoru a Li-ion článku. V případě plného nabití superkondenzátoru je přebytná energie ukládána do Li-ion článku a nedochází k jejímu maření. Při provozu je naopak využito superkondenzátoru pro vykrytí náhlých příkonových špiček vestavěné aplikace. Tím dochází k optimálnímu využití získané energie.

V následujících bodech jsou jmenovány zdroje, které dávají největší smysl vzhledem k zamýšlenému užití.

## 6.1 Akumulátory NiMH, NiCd

Akumulátory na bázi niklu jsou využívány hojně od 2. poloviny 20. století. Byli jednoduchou náhradou, do té doby běžně používaných olověných akumulátorů. Prvními byly akumulátory na bázi NiCd. Využití našly ve všech odvětvích lidské činnosti. Výhodou byla jejich cena a schopnost pokrýt velké příkonové špičky [16]. Dnes se tedy používají pouze pro stacionární trakční aplikace. Obrovskou nevýhodou je ale toxicita kadmia.

Toto částečně vyřešily akumulátory NiMH. Došlo zde k náhradě kadmia za bezpečnější hydridy (sloučeniny kovu s vodíkem). Veškeré pozitivní vlastnosti byly zachovány a došlo k výraznému zvýšení energetické hustoty článku, a tedy ke zvýšení kapacity [16].

Nevýhodou těchto článků je obecně výskyt paměťového efektu. Pro správnou činnost by měly být tyto akumulátory cyklovány z nabitého stavu do plně vybitého stavu. Částečné dobíjení a vybíjení má negativní vliv na chemickou stavbu článku a dochází k výraznému zkrácení životnosti.

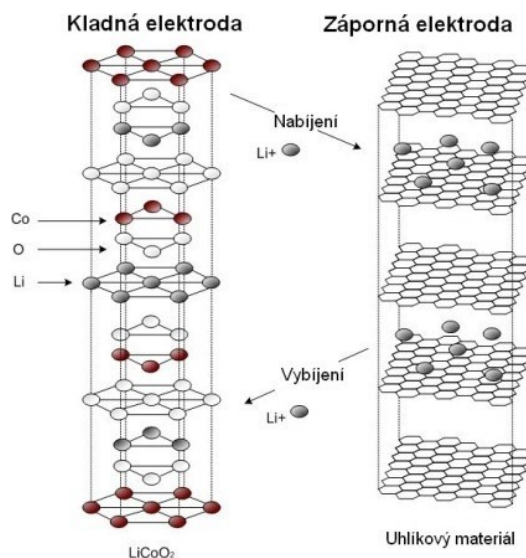
Negativní vlastnosti těchto článků, je opět možné minimalizovat použitím jiných prvků k základnímu niklu. Dnes například NiZn, NiFe aj.

Tabulka 3 - Jednotlivé typy NiXX akumulátorů [16]

Typ článku	NiCd	NiMH	NiFe	NiZn	NiH
Nominální napětí	1,20 V	1,20 V	1,20 V	1,65 V	1,25 V
Energetická hustota	45–80 Wh/kg	60–120 Wh/kg	50 Wh/kg	100 Wh/kg	40–75 Wh/kg
Nabíjecí proud	> 1 C	0,5 – 1 C	-	Běžné nabíjení	-
Vybíjecí proud	> 1 C	1 C	Malý	Vysoký výkon	-
Životnost (cyklů)	1000	300–500	20 let v UPS	200–300	až 70,000
Údržba	Plné vybití každé 3 měsíce	Plné vybití každých 6 měsíců	-	-	Bezúdržbové

## 6.2 Akumulátory na bázi lithia

U lithiových akumulátorů se využívá kladné lithiové elektrody s příměsí pomocných prvků jako je Co, Ni, Mn, V. Záporná elektroda je tvořena uhlíkem. Elektrody jsou od sebe děleny tenkým izolačním filmem. Prostor článku je vyplněn elektrolytem s obsahem lithia. Během provozu dochází k přesunu iontů lithia mezi kladnou a zápornou elektrodou [17], jak je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 24 - Funkce lithiových akumulátorů [17]

Akumulátory na bázi lithia se čím dál více prosazují především díky vysoké energetické hustotě v řádech stovek Wh/kg a malému samovybíjení.

Výhodou je také větší zatížitelnost a životnost než u většiny akumulátorů. Proti běžným elektrochemickým akumulátorům mají výhodu v tom, že nedochází přímo k chemické reakci, ale pouze přesunu iontů mezi materiálovými mřížkami elektrod [17].

Nevýhodou je přítomnost samotného lithia v akumulátoru, ten reaguje se vzduchem a vlhkostí. Při porušení článku může dojít k požáru a explozi. To částečně řeší technologie LTO – lithium – titan – oxid [17].



Obrázek 25 - Příklad Li-ion článku SLB08115L140 fy Nichicon (14 mAh  $\varnothing$ 8 x 11,5 mm) [18]

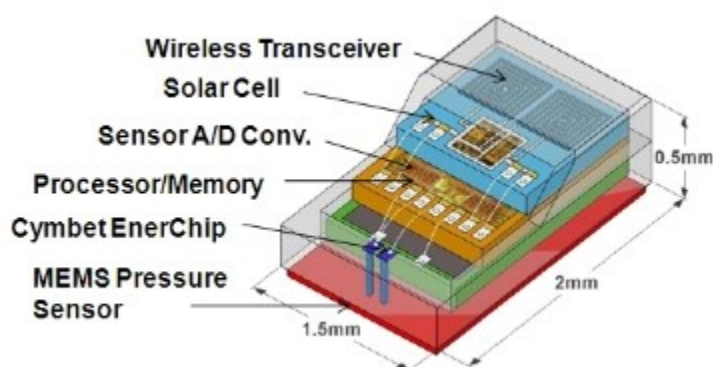


## 6.3 Solid-state battery

Baterie Solid-state využívají pro svou činnost pevného elektrolytu. Jako u Li-ion článku je využíván elektrolyt s lithiem, ale v pevné formě [1]. Většina komponent je totožná jako u Li-ion článku, zásadní rozdíl je v konstrukci.

Nevyužívá se návinu izolační vrstvy s anodou a katodou, ale pouze jedné vrstvy. Použitím flexibilního separátoru lze dosáhnout flexibilních článků, které mohou být opakovaně namáhány bez jejich poškození.

Tyto články jsou využívány především u energeticky nenáročných aplikací. Jejich kapacita dosahuje desítek  $\mu\text{Ah}$  až jednotek  $\text{mAh}$  [1], což zcela dostačuje. Nejčastější použití je u zálohování hodin reálného času, zálohování paměťových modulů a stále častěji u vestavěných systémů s nízkým příkonem [19].



Obrázek 26 - Solid-state baterie vestavěná v aplikaci snímače nitroočního tlaku [19]

Výhodou je tedy jejich bezpečnost a nezávislost na environmentálních podmínkách. Články mohou bez poškození vnitřní struktury fungovat i v extrémních teplotách. Jedná se o přímou alternativu k použití superkondenzátoru.

Nevýhodou je, ale jako u všech chemických článků, omezená životnost. Na dalším obrázku je vidět baterie EnerChip™ CBC050-M8C s kapacitou 50  $\mu\text{Ah}$  a životností 5000 cyklů (nabíjení z 10 % DoD na 80 % DoD) [19]. Konkrétní zapouzdřený článek se již nevyrábí, výrobce CYMBET ale nabízí tzv. „Bare Die“ pro přímou integraci na čip. Cena tohoto článku se pohybuje od 0,2 USD za kus [19].



Obrázek 27 - ENERCHIP™ - holý článek (vlevo) a článek v QFN 8 x 8 mm pouzdru [19]

## 6.4 Superkondenzátory

Hlavním rozdílem mezi kondenzátorem a superkondenzátorem je především v mnohem větší kapacita v řádech mF - F. Standardní kondenzátory nejsou pro potřeby získávání energie příliš vhodné. Zásadní nevýhodou je nízká kapacita, a tudíž nedostatek energie pro provoz náročnějších vestavěných aplikací. Vzhledem k trendu snižování spotřeby je možné u energeticky méně náročných aplikací, použití běžných elektrolytických kondenzátorů.

Existuje několik principů ukládání elektrické energie v superkondenzátorech.

Základním principem je uchovávání elektrického náboje EDLC (Electric Double Layer Capacitor), náboj je vázán elektrostatickými silami na elektrody jako je tomu u běžných kondenzátorů [20].

Druhou možnou metodou jsou EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitor). Jak může být patrné z označení, nevyužívají již elektrostatických vazeb, ale dochází k chemické reakci na elektrodách [20].

Hlavní výhodou této technologie je to, že při cyklickém nabíjení a vybíjení nedochází k opotřebení jako u akumulačních prvků, které využívají chemické reakce [16][20]. Jejich životnost je tedy podstatně větší než u tradičních akumulátorů, které využívají přeměny elektrické energie na chemickou a naopak.

Další výhodou je také menší samovybíjení, možnost použití v širším spektru environmentálních podmínek a všeobecně lepší charakteristiky než u akumulátorů.

Tabulka 4 - Porovnání vlastností Superkondenzátoru a Li-ion akumulátoru [16]

Typ	Superkondenzátor	Lithium-ion (obecně)
Doba nabíjení	1–10 s (typ.)	10–60 minut
Cyklická životnost	až 1 milion cyklů / 30 000 h	≥ 500 cyklů
Napětí článku	2,3 až 2,75 V (typ.)	3,6 V
Energetická hustota [Wh/kg]	5 (typ.)	120–240
Měrný výkon [W/kg]	až 10000	1000–3000
Životnost	10–15 let	5–10 let
Teplota pro nabíjení	–40 až 65 °C	0 až 45 °C
Teplota pro vybíjení	–40 až 65 °C	–20 až 60 °C
Samovybíjení (30 dnů)	Vysoké (5–40 %)	≤ 5 %

## 7 Porovnání IC pro energy harvesting z tepelných měničů

V této části se především zaměříme na porovnání a výběr nejvhodnějšího obvodu pro energy harvesting z tepelných měničů. Integrovaných obvodů pro použití s termoelektrickými měniči je mnoho. Do tohoto porovnání byly zařazeny především ty, u nichž má smysl použití v aplikacích, které pracují s nízkým výstupním napětím z tepelného měniče.

V potaz byla také brána možná úprava obvodem pro studený start nebo možnost experimentální úpravy formou záměny jednotlivých elektronických komponent pro úpravu vstupního napětí. (např. změna poměru vinutí transformátoru, změna cívky, použití nižších kapacit u vstupních kondenzátorů apod.)

Především se jedná o porovnání hodnot minimálního vstupního napětí pro studený start měniče a schopnost provozu z velmi malých zdrojů elektrické energie.

### 7.1 STMicroelectronics SPV1050

SPV1050 je kompletní řešení systému napájení zařízení. Integrovaný obvod obsahuje části potřebné pro získání energie – spínací část měniče s řízením MPPT, nabíjení superkondenzátoru nebo akumulátoru s možností nastavení výstupního napětí daného elementu. Obvod obsahuje jak funkční část pro měnič nabíjecí pumpy a také spínací část měniče s indukčností, díky kterému je dosaženo vysoké účinnosti přeměny energie až 92 %. Obvod využívá pouze jednoduché cívky s feritovým jádrem.

Potřebné napájecí napětí pro zahájení činnosti nabíjecí pumpy činí  $V_{IN-MIN} \geq 150$  mV při minimálním proudu  $I_{MIN} = 5$   $\mu$ A resp. 30  $\mu$ A v závislosti na konfiguraci měniče [21]. Po zahájení regulace je obvod schopen pracovat i se vstupním napětím  $V_{IN} \geq 75$  mV [21]. Takto je schopen měnič pracovat až do hodnoty  $V_{IN} = 2,6$  V [21]. Při této úrovni napětí již zahájí činnost zvyšující měnič s tlumivkou, který je schopen vyšší účinnosti přeměny elektrické energie.

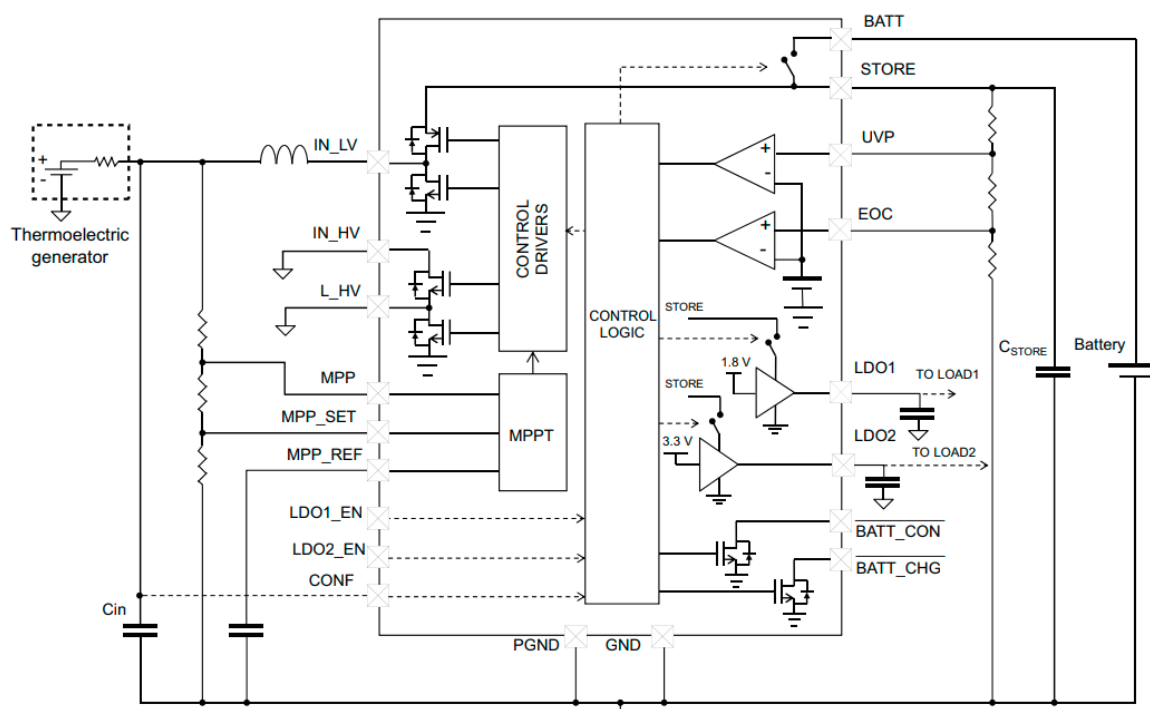
Maximální vstupní napětí obvodu může dosahovat až  $V_{IN-MAX} = 18$  V [21]. Jako maximální zatěžovací proud výrobce udává  $I_{LDOX-MAX} = 200$  mA [21]. Z dokumentace ale není jasné, zda se jedná o proud maximální sdílený pro oba výstupy nebo je hodnoty tohoto proudu možno dosáhnout na obou LDO regulátorech současně.

Obvod lze používat pro získávání energie z fotovoltaických článků a termoelektrických generátorů.

Výstupní napětí pro napájení aplikace je dále upraveno LDO regulátorem a vyvedeno na piny LDO1 a LDO2 kde  $V_{LDO1} = 1,8$  V a  $V_{LDO2} = 3,3$  V [21]. Oba tyto výstupy jsou nezávisle na sobě spínány pomocí pinů LDO1\_EN a LDO2\_EN přivedením logické úrovně „high“ [21].

Mezi výhody patří především integrace MPPT regulátoru. Ten nalezne uplatnění především u aplikací, které jako zdroj používají fotovoltaické články. Samotné nastavení regulátoru se provádí pomocí odporového děliče.

Obvod obsahuje také výstup pro uchování energie v akumulátoru. Lze nastavit minimální a maximální napětí pro ochranu akumulátoru před podbitím a přebitím. Samotné napětí akumulátoru lze konfigurovat v rozmezí  $V_{BATT} = 2,2 - 5,3 \text{ V}$  [21].



Obrázek 28 - Typické zapojení SPV1050 [21]

## 7.2 E-PEAS AEM20940

Tento obvod je přímo určen pro získávání energie z tepelných měničů. Díky nízkým hodnotám vstupního napětí je možné tento obvod využívat právě u řešení, kde se předpokládá nízký teplotní diferencíál na termoelektrickém měniči. Minimální hodnota napájecího napětí je  $V_{IN-MIN} \geq 50 \text{ mV}$  a měnič je schopen studeného startu již od hodnoty  $V_{IN-COLD} = 60 \text{ mV}$  [22]. Tyto hodnoty napětí, ale platí pouze v případě, kdy je na piny CSIN a CSOUT připojen obvod pro studený start. Podmínkou je také minimální množství vstupní energie  $P_{MIN} \geq 150 \mu\text{W}$  [22].

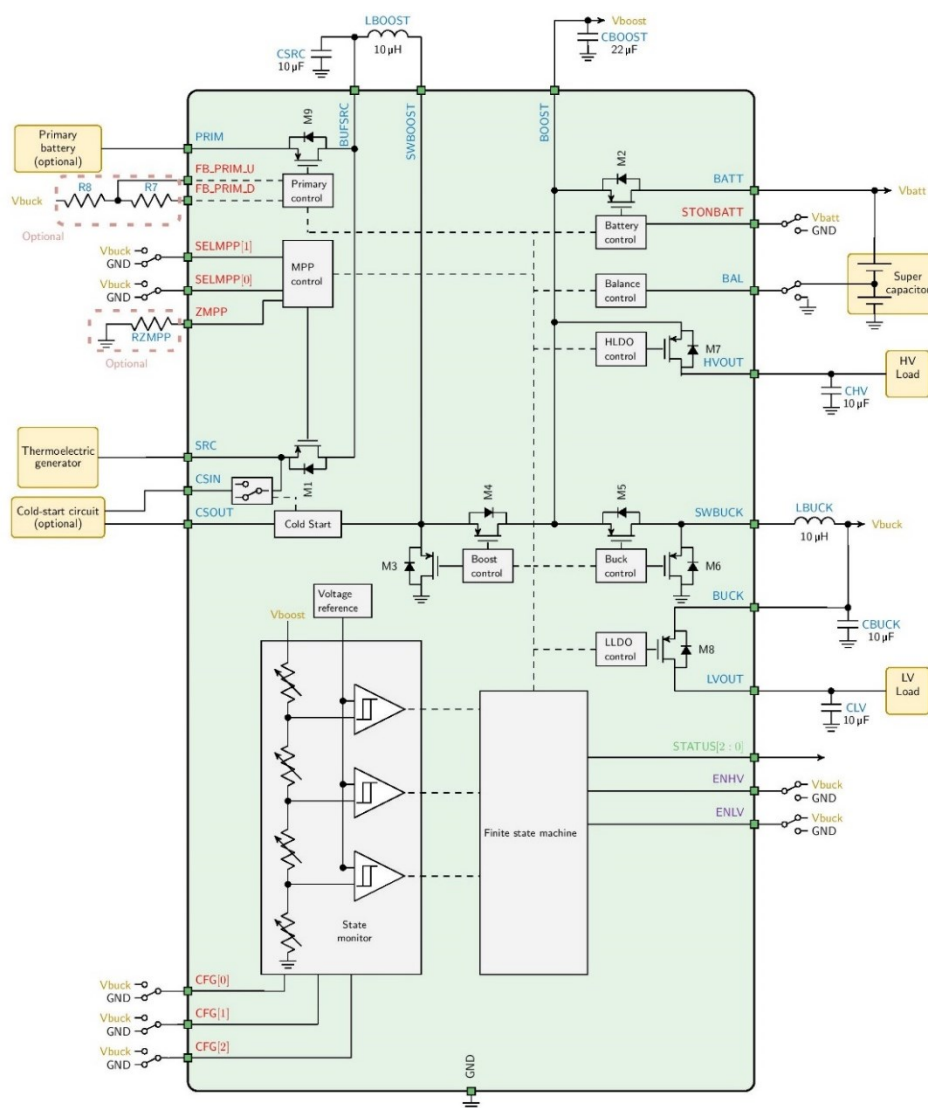
Z dostupných zdrojů a produktových fotografií je patrné, že obvod studeného startu je s největší pravděpodobností tvořen zvyšujícím měničem s využitím transformátoru. Na DPS vývojové desky obvodu je přítomný transformátor s poměrem závitů 1:20, řídicí obvod, usměrňovací diody a kondenzátory. Výrobce v produktovém listu obvodu přesně nespecifikuje, o jaký typ měniče se jedná. Není zde nijak dále dokumentován. Na případné dotazy se výrobce odkázal na výrobní tajemství. Samotný obvod pro studený start je součástí vývojové desky obvodu AEM20940.

Bez tohoto přídatného obvodu je minimální hodnota napětí pro zahájení činnosti  $V_{IN-COLD} = 380 \text{ mV}$  s potřebou minimální dodané energie do obvodu  $P_{MIN} \geq 100 \mu\text{W}$  [22]. Získávání energie je možné až do hodnoty  $V_{IN-MAX} = 5 \text{ V}$  [22]. Maximální zisk proudu je  $I_{MAX-HARV} = 110 \text{ mA}$  [22]. Obvod disponuje funkcí MPPT, a to v celém pracovním rozsahu vstupního napětí. Hodnota regulace je nastavitelná pomocí pinů SELMPP [0-1]. Nastavení je možné provést na určitý poměr napětí

nezatíženého napětí vstupu nebo na automatické přizpůsobení impedance měniče k impedanci termoelektrického měniče.

Výstup je řešen dvojicí LDO regulátoru s označením low-voltage a high-voltage. Pro první jmenovaný je hodnota výstupního napětí nastavitelná od  $V_{LDO-LV} = 1,2 - 1,8$  V se zatížitelností až  $I_{LDO-LV} = 20$  mA a hodnota high-voltage výstupu  $V_{LDO-HV} = 1,8 - 3,3$  V se zatížitelností  $I_{LDO-HV} = 80$  mA [22]. Přebytky energie jsou dodávány přes pin BATT do akumulčního elementu. Tím může být Li-ion články, solid state battery, superkondenzátor a jiné prvky umožňující akumulaci. Napětí akumulčního prvku se pohybuje v mezi  $V_{BATT} = 0 - 4,5$  V [22]. Nastavení akumulčního prvku se provádí piny CFG[0-2]. Díky tomu je zajištěna ochrana akumulčního prvku proti přebíjení, podbíjení a jsou zde také definovány jednotlivé hodnoty napětí pro správný chod měničů.

V případě, že již není v akumulčním prvku žádná energie, je možné využít vstupního pinu PRIM pro zálohu napájení pomocí primárního článku. Potřebné napětí pro zálohování napájení se pohybuje v mezi  $V_{PRIM-BUP} = 0,6 - 5$  V [22].



Obrázek 29 - Blokový diagram AEM20940 [22]

## 7.3 Maxim Integrated MAX17710

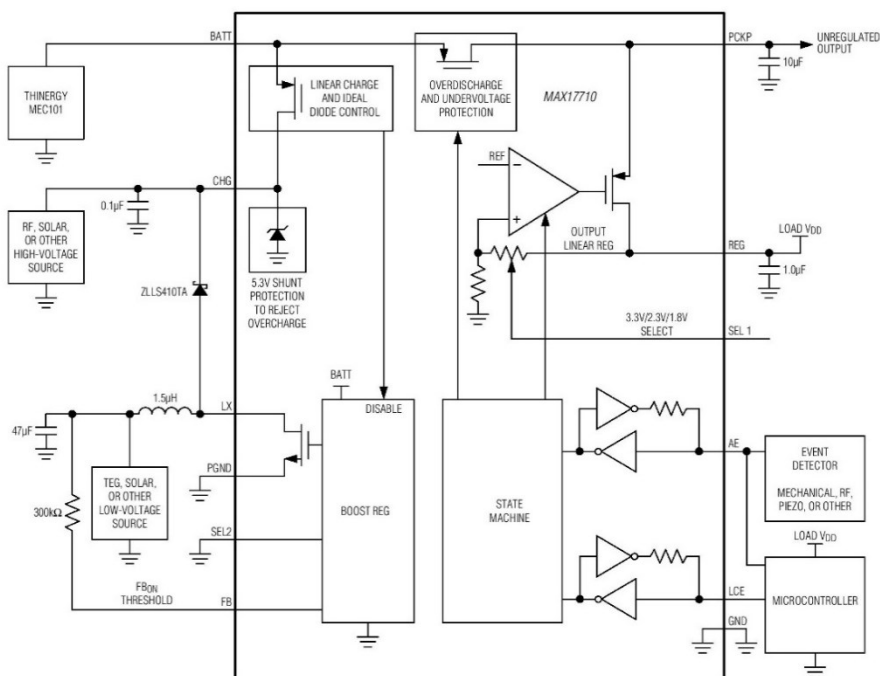
MAX17710 je vybaven obvody pro harvesting, úpravu a následné uchování energie z mnoha okolních zdrojů energie. Zásadní nevýhodou tohoto řešení je přítomnost pouze zvyšujícího měniče využívajícího indukčnosti.

Oproti ostatním obvodům postrádá zvyšující měnič s kapacitou, kterého je využito v počátku přeměny elektrické energie. Kvůli tomu je minimální napětí nejvyšší ze všech porovnávaných řešení. Jeho hodnota dosahuje  $V_{IN-MIN} \geq 750 \text{ mV}$  a minimálního proudu  $I_{MIN} \geq 625 \text{ nA}$  [23]. Pro správnou funkci je také třeba zajistit minimální množství energie  $P_{MIN} > 1 \text{ } \mu\text{W}$  [23]. Výstup pro aplikaci je řešen LDO regulátorem o napěťových hladinách  $V_{OUT-LDO} = 1,8; 2,3; 3,3 \text{ V}$  [23].

K volbě výstupního napětí dochází pomocí pinu SEL1. Spínání výstupu je prováděno přivedením příslušné logické hodnoty na pin AE. Jako maximální zatěžovací proud výrobce udává  $I_{MAX} = 75 \text{ mA}$  [23]. Přebytky energie jsou uchovávány v lithiovém akumulátoru [23].

Toto řešení nelze tedy použít u zdrojů, které poskytují nízkou hladinu výstupního napětí v řádech desítek mV. Pro správnou funkci obvodu by bylo nutné použít dalšího obvodu umístěného mezi zdroj elektrické energie a obvod MAX17710. Přítomnost dalšího měniče negativně ovlivňuje ekonomickou stránku aplikace a případnou spolehlivost měniče.

Výrobce Maxim Integrated nabízí ve svém portfoliu také měnič MAX20361, který je novější a nabízí možnost použití nižšího vstupního napětí  $V_{IN-MIN} \geq 225 \text{ mV}$ . Obvod podporuje také komunikaci pomocí I2C a obsahuje interní registry pro nastavení parametrů měniče. Nevýhodou je ale naopak to, že tento obvod je primárně uzpůsoben pro získávání energie z fotovoltaických článků.



Obrázek 30 - Blokový diagram MAX17710 [23]

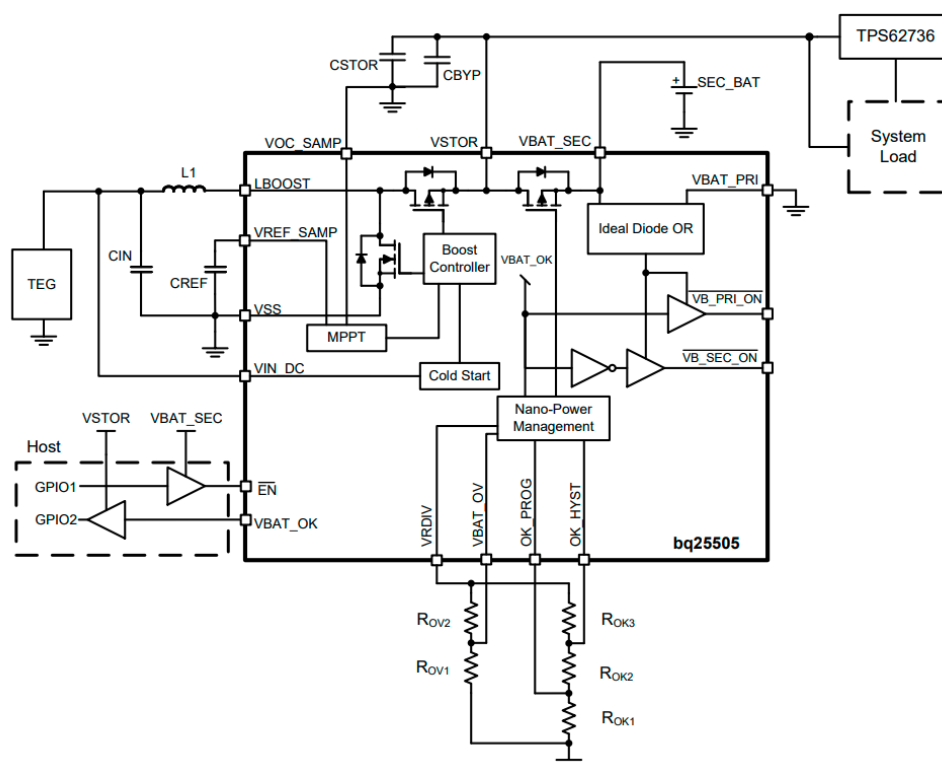
## 7.4 Texas Instruments BQ25505

Jedná se o obvod firmy Texas Instruments. Obsahuje část pro přeměnu a management uchování energie. Je zde také doplněná možnost záložního napájení z primární baterie. Lze jej porovnat také s obvodem od stejné firmy a to BQ25570. Ten ale postrádá možnost zálohování napájení pomocí primární baterie při vybití akumulátoru. Obvod je specificky určen pro získávání energie z tepelných a fotovoltaických zdrojů.

Pro zahájení přeměny elektrické energie v měnič, je nutné dosažení minimální hodnoty vstupního napětí  $V_{IN-MIN} \geq 600 \text{ mV}$  [24]. Po zahájení činnosti měniče může klesnout až na hodnotu  $V_{IN-CONTI} \geq 100 \text{ mV}$  [24]. V případě potřeby je možné měnič provozovat z připojeného akumulátoru s minimálním napětím  $V_{IN-BAT} \geq 100 \text{ mV}$  [24]. Výstupní napětí se pohybuje v rozmezí  $V_{OUT} = 1,8 - 4,2 \text{ V}$  [24]. Toto je nastavitelné pomocí příslušných hodnot odporů napěťového děliče. Maximální poskytovaný proud činí  $I_{MAX} = 230 \text{ mA}$  [24]. Výstup napětí je řešen přímým napojením na pin VSTOR.

Pro napájení samotné aplikace je vhodné použití dalšího měniče. Výrobce v dokumentaci zmiňuje měnič TPS62736 nebo TPS62737. Primárním účelem je regulace hodnoty napětí pro napájení zátěže.

Obvod je také vybaven MPTT regulátorem s možností nastavení požadovaného bodu regulace na V-A charakteristice daného zdroje energie. Nastavení se provádí zapojením odporového děliče mezi zemí a vstupním pinem s vyvedenou napěťovou referencí na pin VOC\_SAMP.

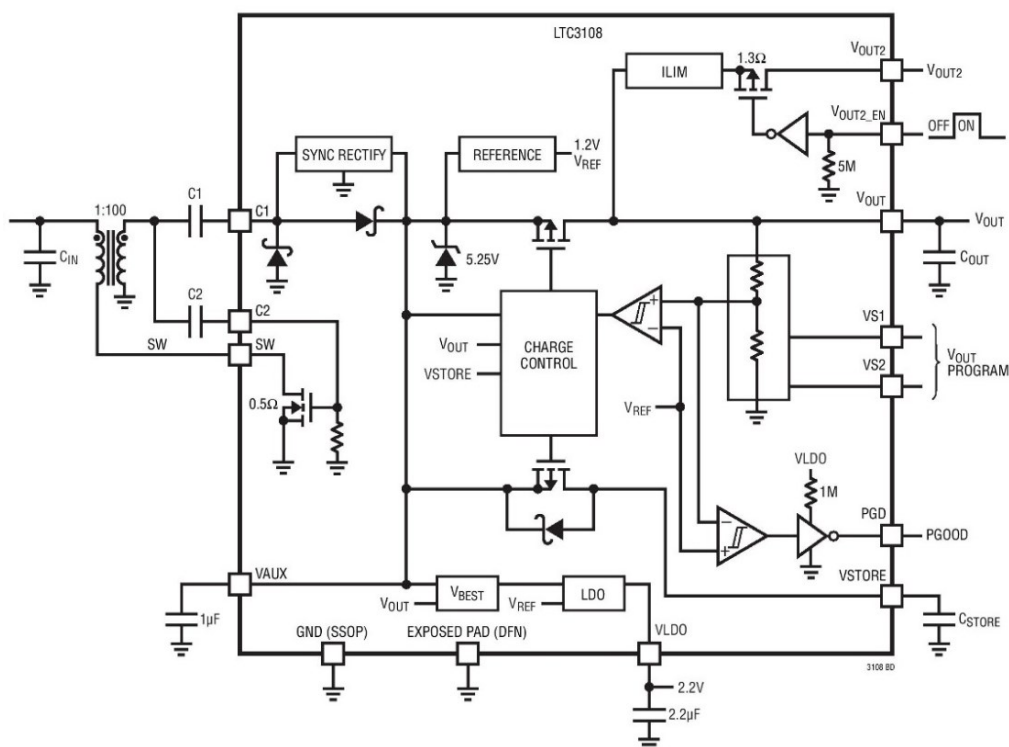


Obrázek 31 - Typické zapojení s BQ25505 pro použití s TEG [24]

Nevýhodou tohoto řešení je opět vysoká hodnota minimálního vstupního napětí.

Jedná se o vysoce integrovaný DC-DC měnič s funkcionalitou pro přeměnu a následné uchování elektrické energie v superkondenzátoru. Dle údajů výrobce je tento integrovaný obvod schopen zajistit získávání energie již od napětí zdroje o hodnotě  $V_{IN-MIN} \geq 20 \text{ mV}$ , což u některých typů Peltierových měničů znamená nutnost přítomnosti teplotního diferenciálu v úrovni  $1^\circ\text{C}$  [25].

Nevýhodou je ale nižší efektivita přeměny elektrické energie. To je převážně dáno tím, že obvod nedisponuje MPPT regulací. Tato funkcionalita je řešená impedančním přizpůsobením obvodu. Výrobce udává doporučenou hodnotu odporu termoelektrického měniče v rozmezí  $R_{IN} = 2\text{--}10\ \Omega$  [25].



Obrázek 32 - Blokové schéma LTC3108 [25]



Obvod poskytuje celkem tři výstupy napájení. Výstup VLDO realizovaný pomocí lineárního regulátoru poskytuje napětí  $V_{LDO} = 2,2 \text{ V}$  s možností zatížení  $I_{LDO-TYP} = 11 \text{ mA}$  [25]. Výstupní napětí  $V_{OUT}$  je nastavitelné pomocí konfiguračních pinů VS1 a VS2 na hodnoty  $V_{OUT} = 2,35; 3,3; 4,1; 5 \text{ V}$  s proudovou zatížitelností  $I_{VOUT-TYP} = 4,5 \text{ mA}$  [25]. Napětí na výstupu  $V_{OUT2}$  je totožné s  $V_{OUT}$ . Je zde ale možnost větší proudové zatížitelnosti a to  $I_{VOUT2-TYP} = 300 \text{ mA}$  [25].

Ukládání energie je řešeno kondenzátorem nebo superkondenzátorem připojeným na pin VSTORE. Do něj jsou ukládány nadbytky vyrobené energie po dosažení regulace na výstupech  $V_{OUT}$  a  $V_{OUT2}$ . Napětí akumulčního prvku se pohybuje v rozpětí  $V_{STORE} = 0 - 5,25 \text{ V}$  [25].

Obvod nelze použít pro ukládání energie do akumulátoru, a to z důvodu absence ochrany akumulátoru. Pro zálohování akumulátorem je nutno použít např. obvod LTC4070 nebo LTC4071 [25].

Jako vhodnou alternativu tohoto obvodu by bylo možné použít ADP5092 nebo ADP5091, které jsou navíc vybaveny MPPT regulací, ochranou akumulátoru a umožňují zálohování primárním článkem. Nevýhodou je ale vyšší minimální vstupní napětí  $V_{IN-MIN} \geq 80 \text{ mV}$ .

## 7.6 Nowi NH2D0245

Dle údajů výrobce se má jednat o vysoce integrovaný multifunkční obvod pro získávání energie ze širokého spektra energetických zdrojů pracující již od  $50 \text{ mV}$ . Vzhledem k tomu, že výrobce na svých stránkách neposkytuje produktový list tohoto obvodu, byl v této věci kontaktován. Získání potřebných informací bylo ale vázáno nutností podpisu NDA. Dále jsem se již tímto obvodem tedy nezabýval.

## 7.7 Analog Devices LTC3109

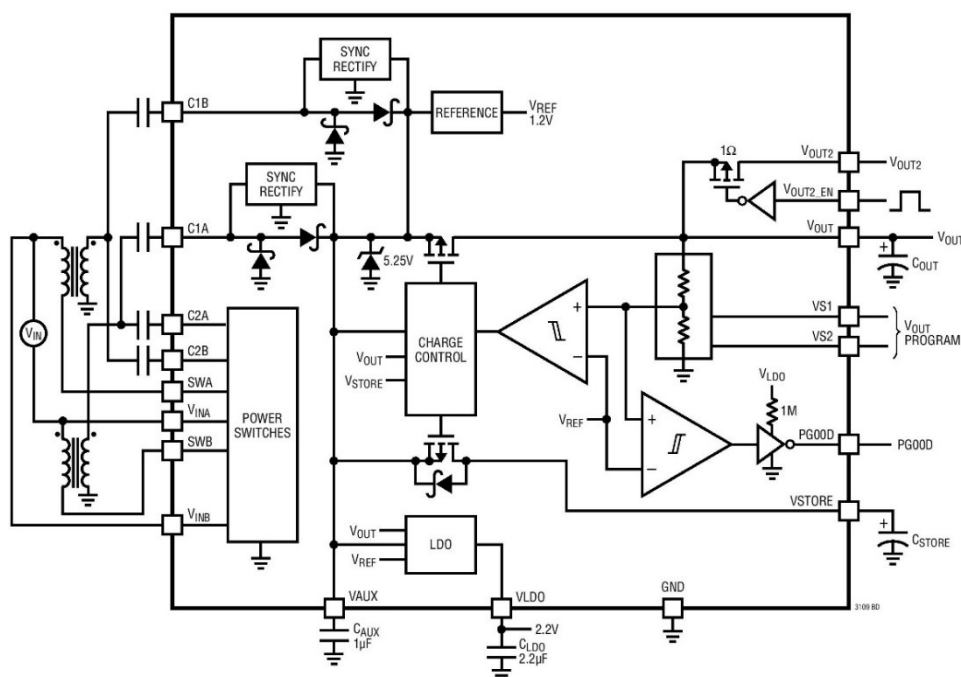
Jedná se o obvod založený na stejném principu jako LTC3108. Rozdíl je ve vstupní části. U tohoto obvodu jsou vstupní transformátory s kondenzátory zdvojeny, a to z toho důvodu, aby bylo možné získávat energii z termoelektrického měniče bez závislosti na vstupní polaritě napětí. Lze tedy využívat obou polarit teplotních diferenciálů a teoreticky tak získat většího množství energie. Výrobce uvádí, že tímto obvodem lze získávat energii z Peltierova měniče s přivedeným teplotním diferenciálem již od hodnoty 1 °C [26].

Pro vinutí transformátoru 1:100 lze získávat energii již od hodnot vstupního napětí  $V_{IN-MIN} \geq 30 \text{ mV}$  nezávisle na jeho polaritě [26]. Obvod také nedisponuje funkcí MPPT.

Rozdíl mezi obvody je především ve výstupní části. Výstup VLDO realizovaný pomocí lineárního regulátoru poskytuje napětí  $V_{LDO} = 2,2 \text{ V}$  s možností zatížení  $I_{LDO-MIN} = 5 \text{ mA}$  a  $I_{LDO-TYP} = 12 \text{ mA}$  [26]. Výstupní hodnota napětí  $V_{OUT}$  je také volitelná pomocí pinů  $VS1$  a  $VS2$  na stejné hodnoty jako u LTC3108, napětí je na  $V_{OUT}$  je totožné s  $V_{OUT2}$  s proudovou zatížitelností  $I_{VOUT-TYP} = 15 \text{ mA}$ , pro  $I_{VOUT2-TYP} = 300 \text{ mA}$  [26].

Zásadní výhodou oproti ostatním obvodům je již zmiňovaná nezávislost na polaritě vstupního napětí, která je nativně u tohoto obvodu podporována. Není již nutné používat dalšího obvodu, který by se staral o usměrnění vstupního napětí. Tyto řešení nejsou snadno realizovatelná, jelikož je potřeba vytvoření Graetzova můstku ze Schottkyho diod. Respektive diod s minimálním úbytkem napětí.

Tento měnič byl vybrán jako nejvhodnější pro další testování. Podrobné parametry týkající se jeho funkce jsou popsány v praktické části EHDB LTC3109.



Obrázek 33 - Blokové schéma LTC3109 [26]

## 8 Testovací přípravek

Pro potřeby porovnávání výtěžnosti jednotlivých termoelektrických článků a jejich následné analýzy použitelnosti v dané aplikaci, bylo nutné sestavit testovací přípravek. Hlavním požadavkem je rychlý ohřev jedné strany termoelektrického generátoru pro vznik teplotního diferenciálu a toku tepla. Toto souvisí s teoretickým rozbohem, zejména pak se Seebeckovým a Peltierovým jevem.

Jedná se o jednoduchou konstrukci, kdy je do hliníkového vodního chladiče přivedeno médium o teplotě  $T_1$  a pasivní chladič je vystaven okolnímu prostředí o teplotě  $T_2$ . Na TEG vzniká teplotní diferenciál  $T$ , kde:

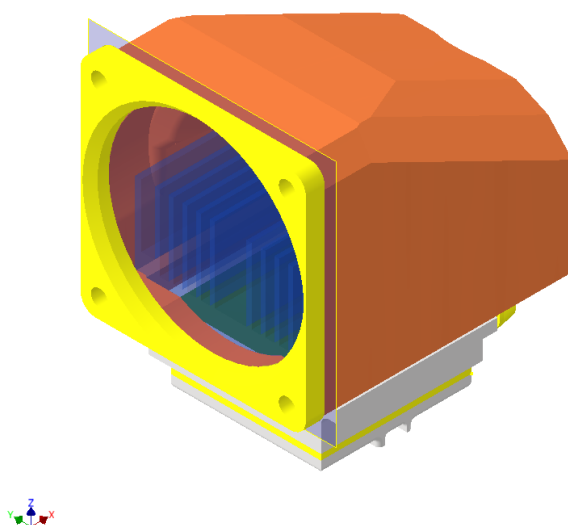
$$T = |T_1 - T_2| \quad (3)$$

O ohřev se stará hliníkový vodní chladič, ve kterém proudí médium, jímž je voda a hliníkový pasivní chladič pro odvod tepla, které proudí přes termoelektrický měnič.

TEG dle předchozích předpokladů generuje elektrické napětí, které je posléze měřeno a vyhodnocováno měřícím řetězcem.

Při prvotních myšlenkách bylo dbáno hlavně na jednoduchost řešení, případné další možnosti úprav a rozšíření testovacího přípravku o regulaci teploty při záměně chladiče (libovolného) za regulovatelný zdroj tepla.

Samotný návrh byl proveden v programu Autodesk Inventor Professional 2021. Návrh přípravku je pro zjednodušení realizován jako samostatné díly, které byly posléze vytištěny na 3D tiskárně Creality Ender 3 a kompletovány lepením sekundovým lepidlem. Vzhledem k tomu, že díly nejsou nijak mechanicky namáhány a slouží pouze jako podpůrná konstrukce, byl jako tiskový materiál zvolen PLA. Jedná se o běžně dostupný materiál, který pro potřeby přípravku plně postačuje.



Obrázek 34 - Model přípravku pro měření energetické výtěžnosti z TEG

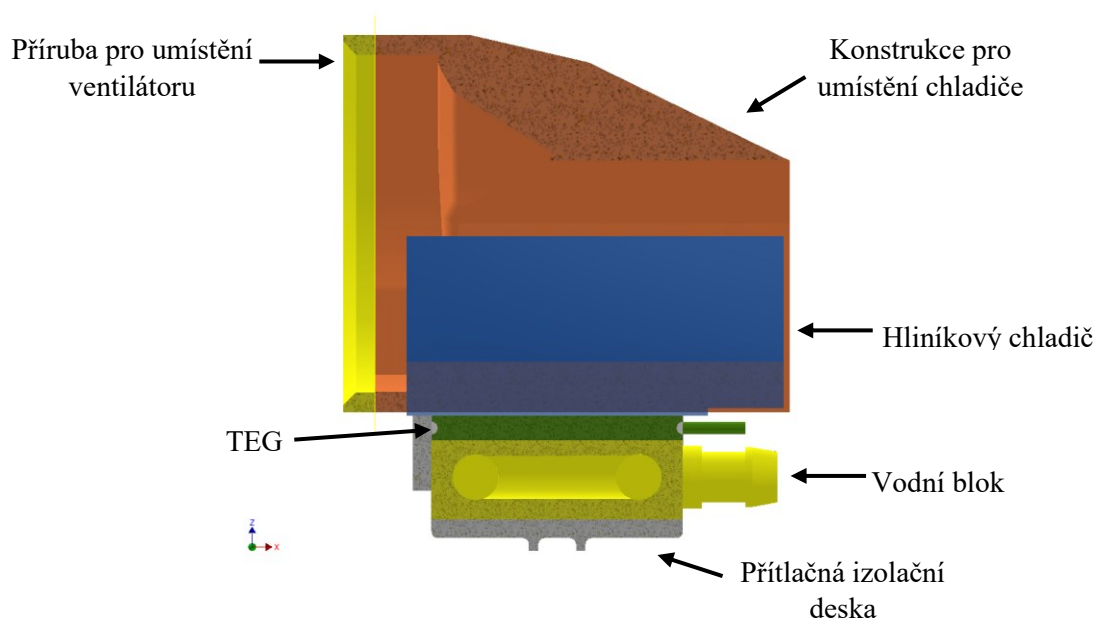
Hlavní komponenty jsou vodní blok, Peltierův článek a hliníkový blok. Jak bylo popsáno výše, po přivedení média (vody), o rozdílné teplotě, než je okolní teplota, dochází k vytvoření teplotního diferenciálu. Mezi hliníkovým chladičem a vodním blokem dochází následně k toku tepla.

Tento tok prochází termoelektrickým měničem, který je tvořen Peltierovým článkem. Ten může být nahrazen také jiným vhodným měničem.

V sestrojeném zařízení je možné měření článků o maximálních rozměrech 40 x 40 mm. Díky rozebíratelné montáži je možná jeho záměna za jiný typ, případně jinou velikost. Přípravek je také možné použít pro měření měničů s menší plochou. V tom případě je nutné vzniklou plochu kolem článku vhodně vymezit tepelnou izolací. Jedná se především o omezení výměny tepla mimo plochu měniče.

Pro zajištění výměny kapaliny blokem je připojeno malé vodní čerpadlo. Čerpací kapacita činí 120 l/h. Hliníkový chladič v útrokách přípravku je chlazen pasivně. Lze také použít nuceného oběhu vzduchu. K přípravku je připevněn ventilátor 80 x 80 mm, nasazeným do příruby přípravku. Vodní čerpadlo s ventilátorem jsou společně napájeny z laboratorního napájecího zdroje s napětím 12 V.

Nevýhodou tohoto řešení je, že není nijak regulována teplota a tepelný výkon přivedený na měnič.

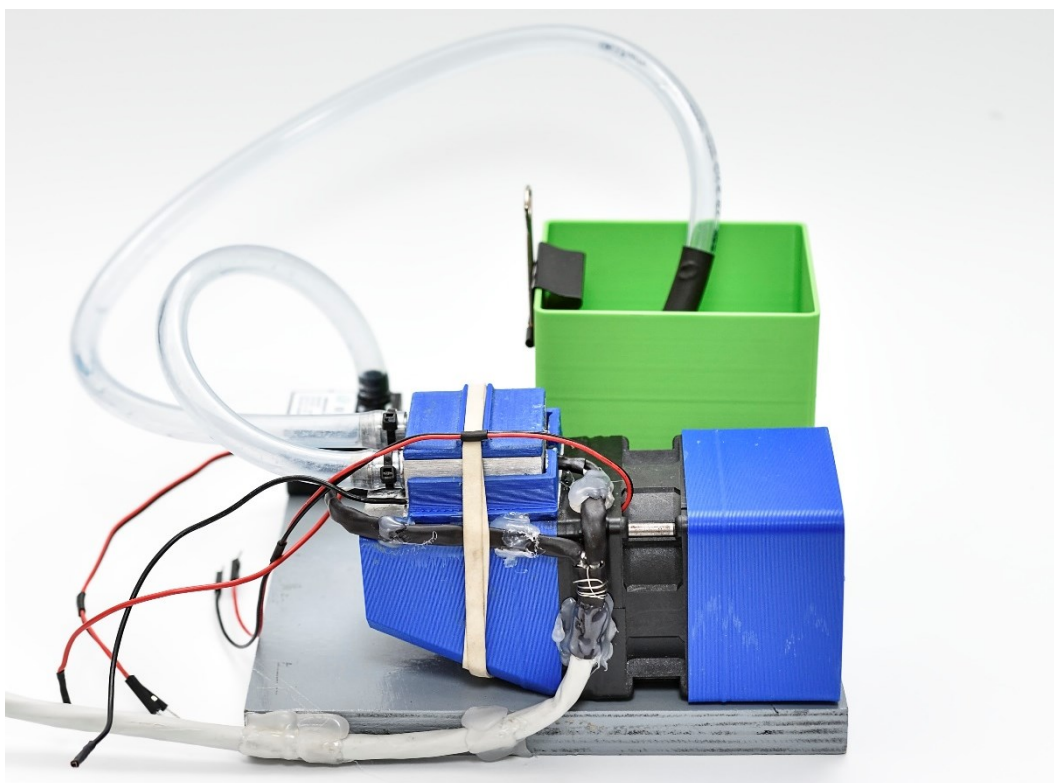


Obrázek 35 - Řez modelem a jeho komponenty

Na následujícím obrázku je zachycen již sestrojený přípravek pro měření termoelektrických generátorů. Zásadním rozdílem proti modelu je především to, že těleso pro testování článku je převráceno (vodním chladičem vzhůru). Důvodem je dosažení jednoduché možnosti výměny článku a obsluhy přípravku při testování.

Za přípravkem je umístěn rezervoár na vodu propojený pomocí PVC hadic s čerpadlem a vodním blokem. Pro dosažení lepšího přenosu tepla mezi jednotlivými komponentami je na měniči z obou stran nanesena teplovodivá pasta ARCTIC MX-4 2019.

Do obou hliníkových chladičů je také vytvořeno zahlbubení. To slouží pro umístění teplotního snímače. Okolní prostor čidla je také vyplněn výše zmíněnou teplovodivou pastou. Detail zapojení a schéma je součástí kapitoly 9.1. Další fotografie přípravku jsou k práci přiloženy v digitální podobě a jsou také součástí příloh.



Obrázek 36 - Finální přípravek pro měření TEG – část pro měření na TEG

## 9 Měřicí a vyhodnocovací zařízení

Následující kapitola se zabývá především návrhem měřícího řetězce na straně hardware i software. Dále je zde popis měření, volba jednotlivých prvků řetězce, vyobrazení měřícího řetězce a popis zatěžovacího přípravku pro měření.

### 9.1 Použitý hardware

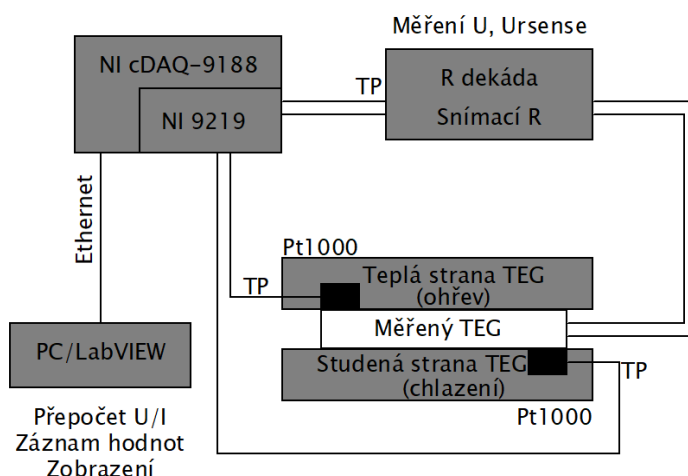
V prvotních pokusech bylo řešeno měření pomocí platformy Arduino UNO s použitím standardního přístrojového vybavení. V případě této varianty docházelo k problémům s odečtem měřených hodnot. Prvním úskalím řešení bylo použití nevhodných snímačů DS18B20. Ty sice dosahovaly vysokého rozlišení  $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$  (12 bit) a odchylky  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale to na úkor doby převodu měřeného signálu. Integrovaný A/D převodník potřeboval pro převod 750 ms. Doba byla potřebná pro každý snímač na sběrnici. Nebylo tedy možné snímat všechny hodnoty teplot najednou.

Druhým problémem bylo zamýšlené použití obvyklých dostupných DMM ke sběru dat. Zde byl problém primárně se záznamem dat a jeho vyhodnocením. Jako optimální řešení bylo nakonec zvoleno použití virtuální instrumentace. Jedná se zde převážně o možnost spolupráce s měřicími kartami a využití klasických měřících přístrojů vybavených komunikačním rozhraním.

Pro sběr dat byla nakonec zvolena měřicí karta NI 9219 výrobce National Instruments. Jedná se o čtyř-kanálovou univerzální měřicí kartu s rozlišením 24 bitů. Pomocí karty jsou měřeny výstupní napětí TEG a úbytek napětí na snímacím rezistoru proudu  $R_{\text{sense}} = 0,22\text{ }\Omega$ . Měření výstupního proudu TEG není realizováno přímo kartou. Problém spočívá v malém proudovém rozsahu a vysokém vnitřním odporu ampérmetru. Integrovaný ampérmetr je tvořen měřícím rezistorem o hodnotě  $20\text{ }\Omega$ , na němž je snímáno napětí. Pro zamýšlené použití je využití vnitřního ampérmetru nerealizovatelné.

Měřicí karta je dále umístěna v šasi NI cDAQ-9188, také od firmy National Instruments. Šasi se stará o napájení a komunikaci s PC. Komunikace probíhá přes rozhraní Ethernet.

Na následujícím obrázku je zjednodušené blokové schéma zapojení měřicí karty k přípravku pro měření TEG se zatěžovací R dekádou, snímacím odporem  $R_{\text{sense}}$  a čidly teploty Pt1000.



Obrázek 37 - Zjednodušené blokové schéma

Pro snímání teploty bylo zvoleno teplotní čidlo Pt1000. Jedná se především o jednoduchou implementaci a rychlou dobu odezvy na změnu hodnoty měřené teploty. Výhodou je také malá velikost 2 x 2,3 x 1,1 mm, ta je tedy výrazně menší než prvně zvažovaný snímač DS18B20 v pouzdru TO-92.

#### Technické specifikace použitého čidla:

Označení výrobce: NB-PTCO-154

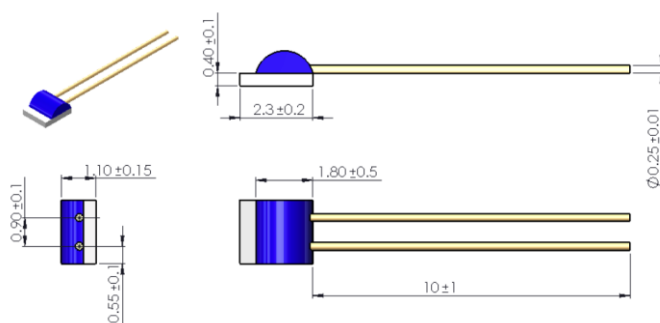
Typ: Pt1000

Typové označení výrobce: PTFC102T1G0

Doba odezvy: 0,2 s

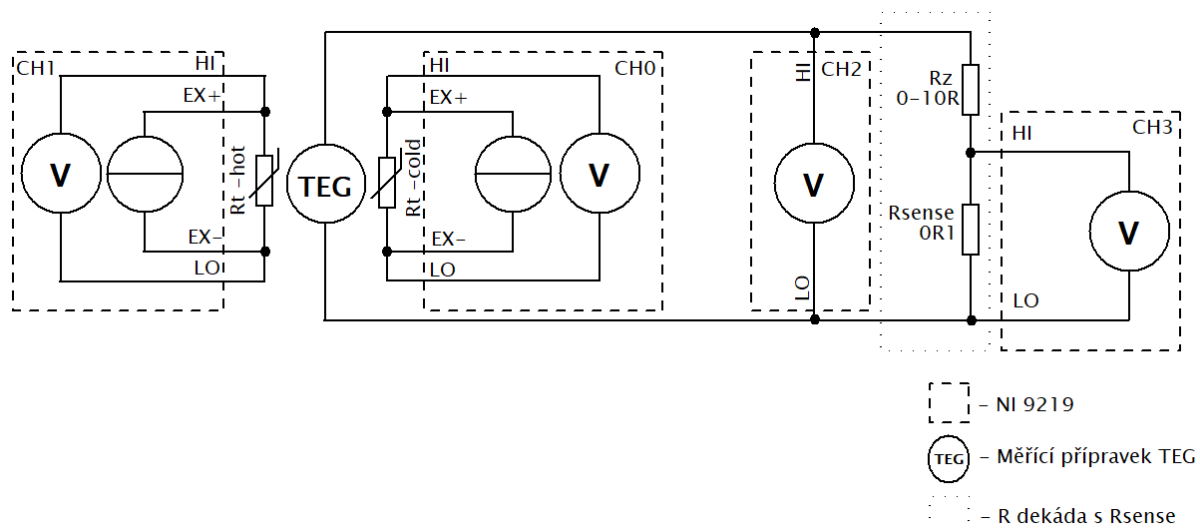
Třída přesnosti: F 0,1 / T = AA

Tolerance:  $\pm (0,10 + 0,0017 \cdot [T/^{\circ}\text{C}])^{\circ}\text{C}$  – rozsah (-30...+200 °C)



Obrázek 38 - Pouzdro PTFC čidla NB-PTCO-154 [27]

Na následujícím obrázku je vidět detailní zapojení měřícího přípravku a všech periférií k měřicí kartě. Jsou zde zaznačeny jednotlivé kanály měřicí karty s jejich připojením na termoelektrický generátor, odporovou dekádu a čidla pro měření teploty. Není zde dokumentováno propojení čerpadla a ventilátoru ke zdroji jejich napájecího napětí.

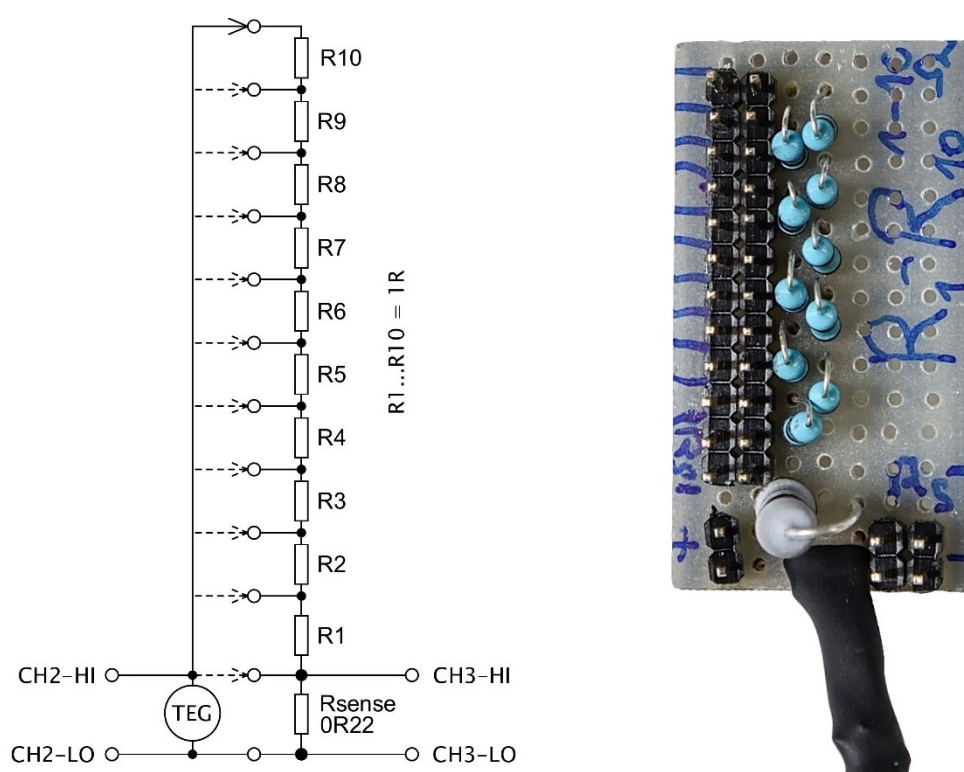


Obrázek 39 - Detailní schéma propojení měřícího karty k měř. přípravku TEG

Pro potřeby zatěžování a měření byla sestrojena jednoduchá odporová dekáda z rezistorů o hodnotě  $1\ \Omega$ . Pomocí přípravku lze simulovat zátěž TEG v rozmezí  $0\text{--}10\ \Omega$ . Výsledného odporu zátěže je dosaženo pomocí vhodného propojení odboček dekády.

Na plošném spoji se také nachází měřicí odpor  $R_{\text{sense}}$  o hodnotě  $0,22\ \Omega$ . Vzhledem k rozsahu měřicí karty bylo zvoleno toto řešení. Průchodem proudu zátěží a měřícím odporem je generováno napětí přímo úměrné proudu dle Ohmova zákona.

Z desky jsou vyvedeny vodiče pro měření tohoto napěťového úbytku a také k měření generovaného napětí TEG. Vodiče jsou vzhledem k nízkým hodnotám měřeného napětí v provedení kroucené dvojlinky s dodatečným stíněním. Všechna stínění jsou propojena a společně připojena k zemnění.



Obrázek 40 - Schéma zapojení měřicí zátěže (vlevo) a fyzická realizace



## 9.2 Program pro měření na testovacím přípravku

Pro zpracování měřených dat, byl vytvořen vlastní jednoduchý měřicí program pro záznam a vizualizaci aktuálních měřených hodnot v reálném čase. Tento program byl naprogramován v prostředí LabVIEW, především díky jednoduché integraci měřících karet a názornosti výsledného programu.

Samotný kód programu je tvořen především nastavením parametrů měřicí karty, cyklickým vyčítáním měřených hodnot, jejich vizualizací a zápisem do souboru. Fotografie kódu je součástí příloh včetně kódu samotného.

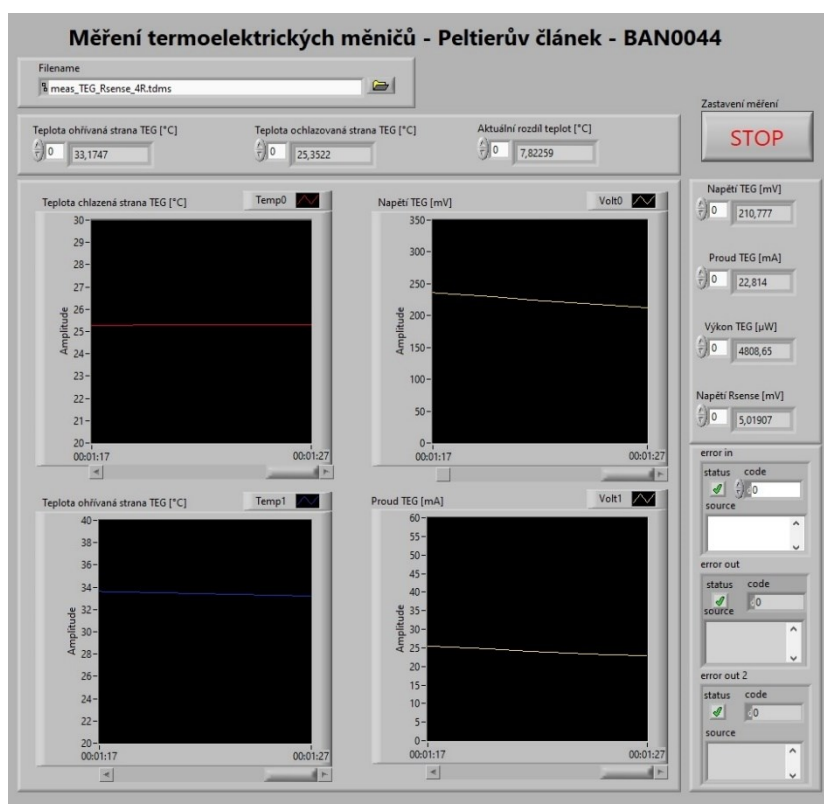
Hlavní částí programu je čelní panel. Zde jsou zobrazeny grafy jednotlivých průběhů měřených veličin a hodnoty samotných měřených veličin, jimiž jsou:

Teplota ohříváné strany TEG [°C], Teplota ochlazované strany TEG [°C] (jsou vyhodnocovány přímým čtením z funkce NI DAQmx). Totéž platí i pro Napětí TEG [mV], Napětí  $R_{sense}$  [mV].

Z měřených hodnot je následně dopočten Proud TEG [mA] a Výkon TEG [ $\mu$ W] dle Ohmova zákona a také aktuální rozdíl teplot [°C] z rozdílu měřených teplot na jednotlivých stranách měniče.

$$I = \frac{U_{R_{sense}}}{R_{sense}} [A; V; \Omega] \quad (4)$$

$$P = U \cdot I [W; V; A] \quad (5)$$



Obrázek 41 - Front panel měřicí aplikace v LabVIEW

### 9.3 Měření termoelektrický měnič

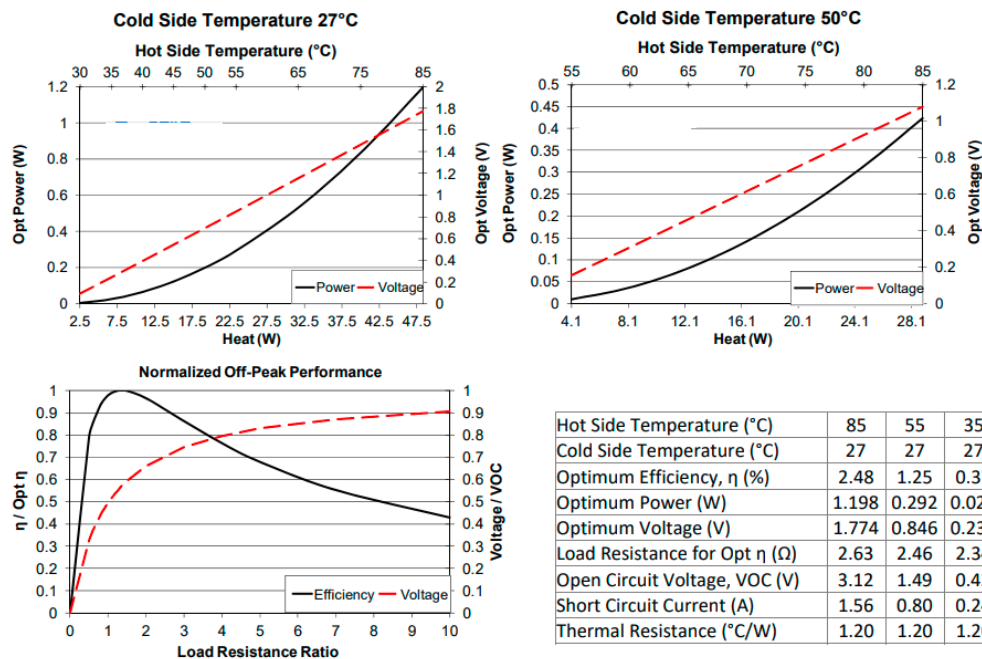
Samotný výrobce integrovaného obvodu, pro získávání energie LTC3109, má ve svém produktovém listu vyjmenovány doporučené Peltierovy články. V tabulce jsou jmenovány články různých výrobců. U většiny z nich jsou v jejich produktových listech uvedeny grafy a měřené hodnoty, především pro použití v režimu odvodu tepla.

V případě článků TEG, kde je přímo zamýšleno použití k získávání energie, jsou parametry článku obvykle ověřovány pro teplotní diferenciály v řádech desítek až stovek stupňů Celsia. Potřebné charakteristiky v rozmezí 0–10 °C obvykle chybí.

Nejlépe popsáním z doporučených článků, pro provoz s integrovaným obvodem LTC3109, je RC12-8-01LS od firmy Marlow Industries.

#### POWER GENERATION PERFORMANCE CURVES

ENVIRONMENT: ONE ATMOSPHERE DRY NITROGEN



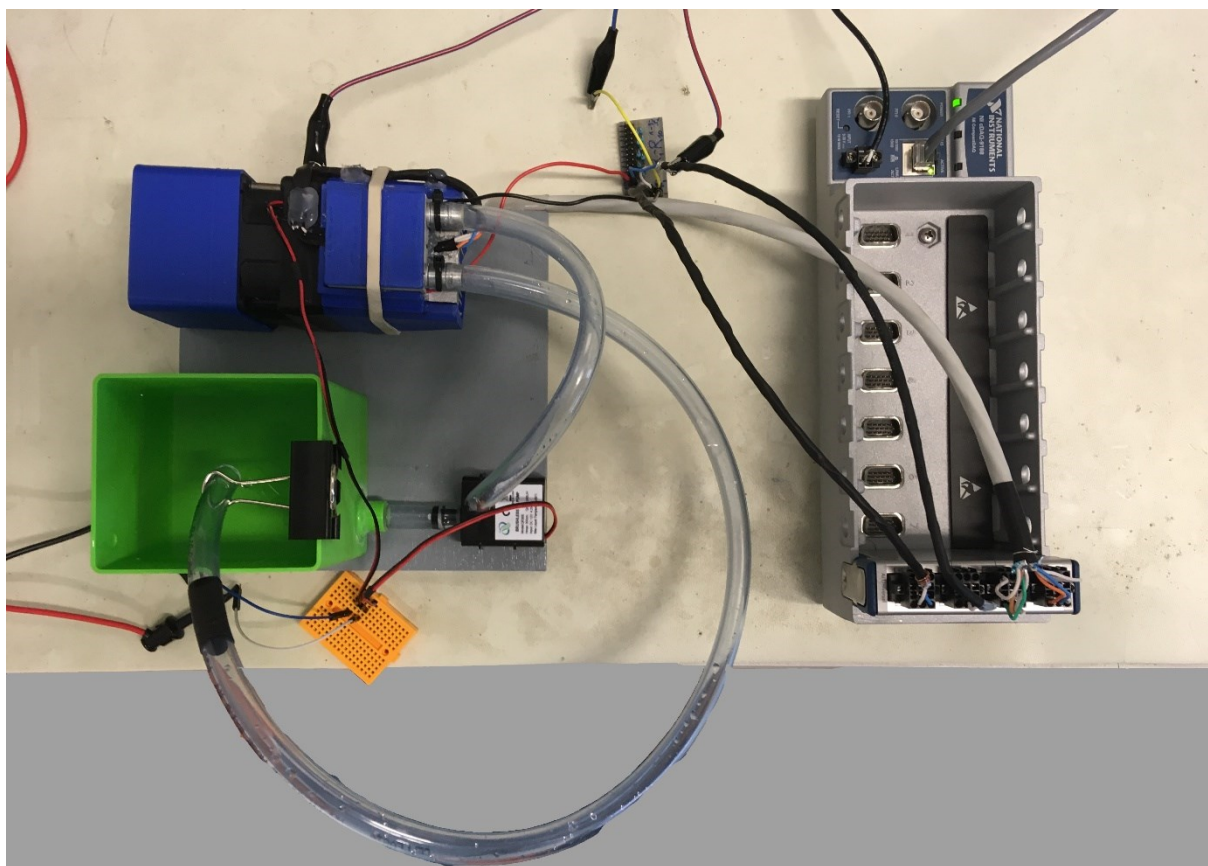
Obrázek 42 - Charakteristiky článku RC12-8-01LS [28]

Pro potřeby experimentálního ověření byl nakonec zvolen běžně dostupný TEC1-12706. Hlavním aspektem byla nízká cena (cca 89 Kč) a běžná dostupnost. Jedná se také o přihlédnutí k faktu, že mezi jednotlivými konstrukcemi článku TEG a TEC není markantní rozdíl, jak je vysvětleno v kapitole 4.

## 9.4 Měření

Princip měření spočívá v naplnění rezervoáru teplou vodou. Ta je pomocí čerpadla cirkulována okruhem vodního chladiče, který zvyšuje svou teplotu. Dochází k vytvoření teplotního spádu mezi kontaktními stranami termoelektrického generátoru, který je umístěn mezi chladiči. Pasivní chladič se stará o odvod tepla, proudícího termoelektrickým generátorem do okolí pomocí nuceného oběhu vzduchu, zajištěného ventilátorem.

Samotné měření může probíhat jak na vzestupné hraně teplotního diferenciálu, tak na jeho hraně sestupné. Z praxe se ale ukázalo, že je mnohem lepší měření na sestupné hraně. Systém dosáhne maxima teplotního diferenciálu a posléze dochází k předávání energie z vody do okolí přes měnič a chladič. Jedno měření s 300 ml vody o teplotě 35–40 °C trvá přibližně 15 minut.



Obrázek 43 - Zapojení přípravku při měření TEG

## 10 Měřené charakteristiky

Pomocí měřicí karty a aplikace byly zaznamenány jednotlivé průběhy měřených veličin do formátu TDMS. Jedná se o formát používaný firmou National Instruments a nabízí se jako jednoduchá možnost pro záznam informací z měřicí aplikace vyvinuté v prostředí LabVIEW.

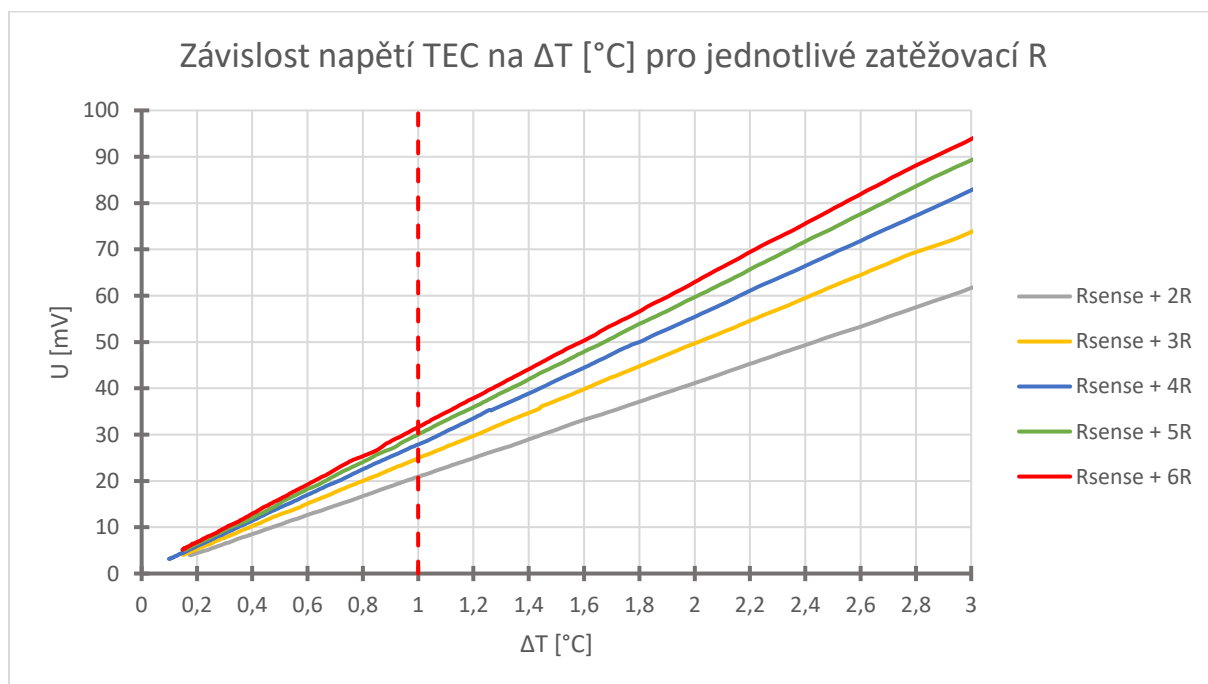
Takto zaznamenané informace byly pro potřeby dalšího vyhodnocování importovány do tabulkového editoru Microsoft Excel a generovány grafy.

Cílem experimentálního ověřování bylo především zjištění jednotlivých charakteristik termoelektrického generátoru, který je vystaven nízkému teplotnímu diferenciálu. Tyto charakteristiky obvykle výrobci v technických listech neuvádějí, případně jsou uváděny pro teplotní diferenciály řádově vyšší. Tyto hodnoty teplotních diferenciálů jsou ale v případě přirozených přírodních zdrojů teplotních diferenciálů jen těžko dosažitelné.

Následující grafy se především zaměřují na rozsah vnitřních odporů dostupných Peltierových článků 2–6  $\Omega$ . Výrobce integrovaného obvodu LTC3109 uvádí doporučený vnitřní odpor Peltierových článků v rozmezí 2–10  $\Omega$ , měření tedy byla provedena pro rozmezí 0–10  $\Omega$  a jsou součástí přílohy této práce.

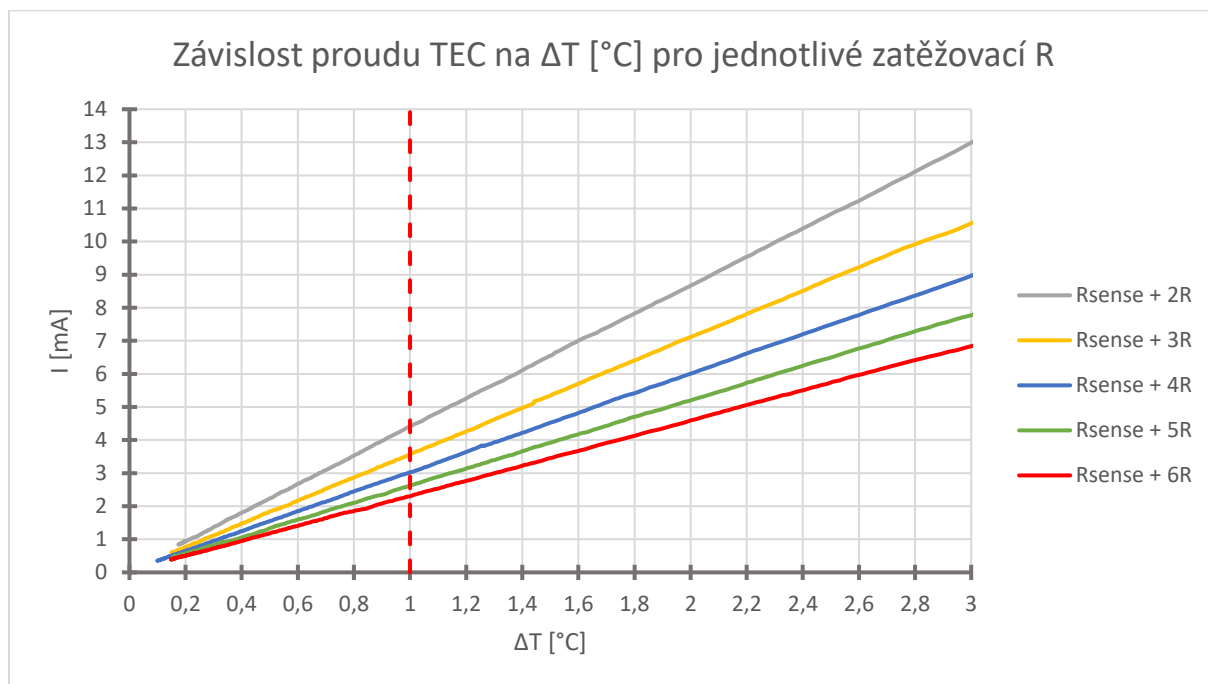
Z následujícího grafu jsou patrné amplitudy získaného napětí pro rozmezí 0–3  $^{\circ}\text{C}$ . Měření probíhalo v intervalu 0–10  $^{\circ}\text{C}$ , tyto grafy jsou opět součástí přílohy, včetně tabulky měřených dat.

Pro správný provoz vývojové desky EHDB\_LTC3109 je nutné napětí vyšší než 30 mV. Reálně byl schopen obvod spolehlivě fungovat až od hodnoty napětí 33 mV. Pro nastartování obvodu je tedy nutný minimální teplotní diferenciál 1 - 1,4  $^{\circ}\text{C}$ .

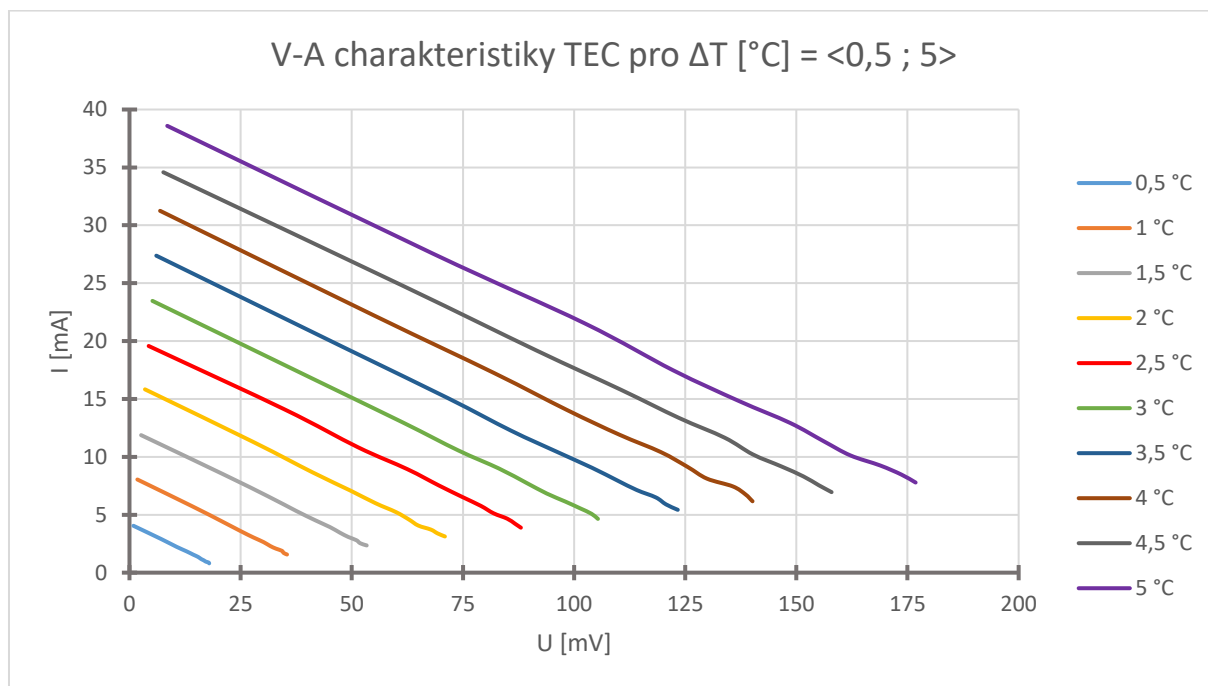


Obrázek 44 - Závislost výstupního napětí na teplotním diferenciálu

Posléze je schopen obvod generovat napětí až do poklesu vstupního napětí na 25 mV. Z naměřených charakteristik je tedy následně schopen spolehlivě pracovat do teplotního diferenciálu 0,8 – 1,2 °C dle vnitřního odporu termoelektrického měniče.

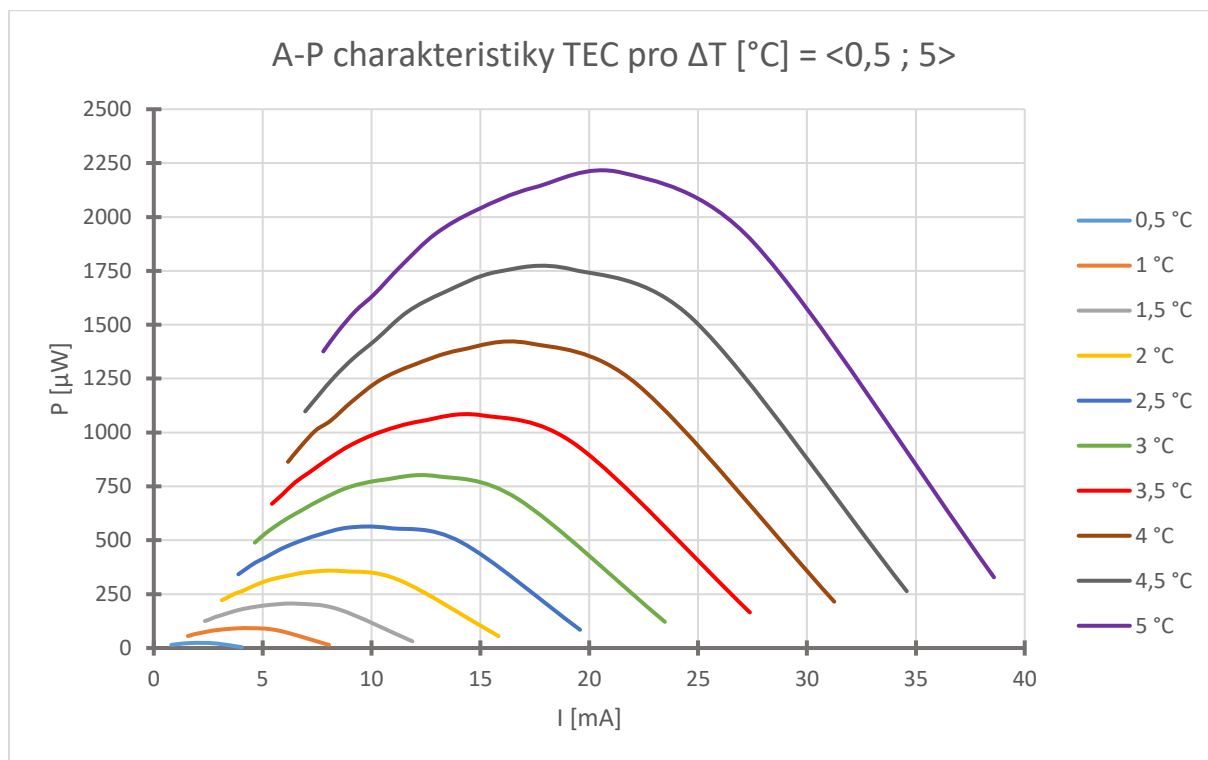


Obrázek 45 - Závislost proudu TEC na  $\Delta T$  [°C]



Obrázek 46 - V-A charakteristiky TEC pro  $\Delta T$  [°C]

Z grafů je patrné, že Peltierovy články jsou schopny dosáhnout nejvyššího výkonu právě při přizpůsobeném zatěžovacím odporu. V tabulce jsou také uvedeny maxima výstupních výkonů pro vybrané teplotní diferenciály z rozsahu 0,5 – 5 °C.



Obrázek 47 - A-P charakteristiky TEC pro  $\Delta T$  [°C]

Z předchozích grafů pochází následující tabulka maximálních měřených hodnot pro testovaný článek. Podstatné jsou především hodnoty maximálních výstupních výkonů z měniče, především pro vyhodnocení teoretické výtěžnosti pro provoz vestavěného zařízení.

Tabulka 5 - Tabulka maximálních měřených hodnot pro jednotlivé  $\Delta T$  [°C]

$\Delta T$ [°C]	U [mV]	I [mA]	P [μW]	P hustota [μW·cm <sup>-2</sup> ]
0,5	17,92	4,05	23,64	1,478
1	35,43	8,05	92,12	5,757
1,5	53,36	11,88	205,47	12,842
2	70,95	15,83	356,59	22,287
2,5	88,03	19,58	558,68	34,918
3	105,37	23,47	797,59	49,850
3,5	123,33	27,38	1079,50	67,469
4	140,14	31,25	1413,89	88,368
4,5	157,92	34,58	1755,98	109,749
5	176,82	38,59	2204,51	137,782

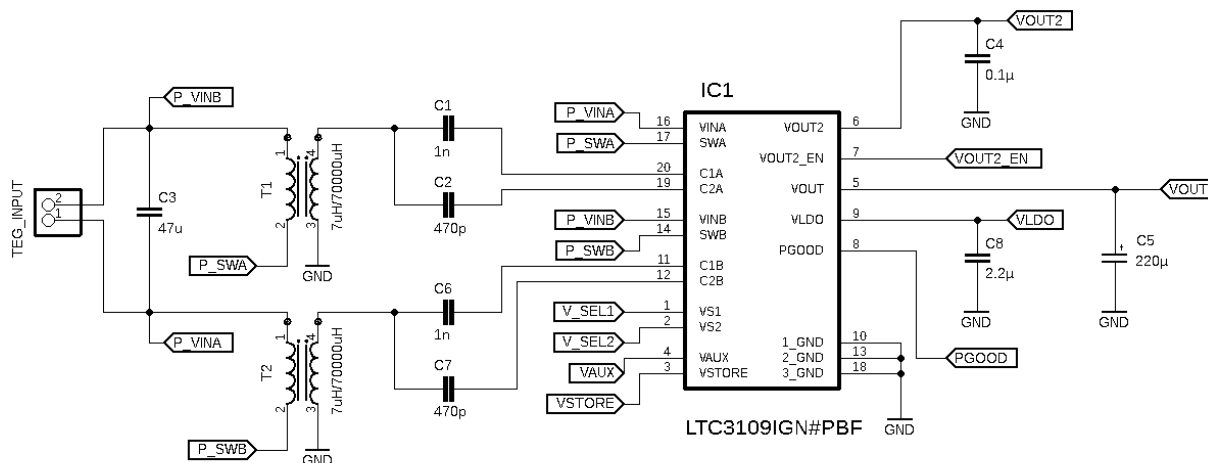
## 11 EHDB\_LTC3109

Pro samotnou realizaci DC-DC měniče byl zvolen obvod LTC3109 od firmy Analog Devices. Důvodem této volby je především jedna z nejnižších hodnot napětí pro studený start obvodu  $V_{IN-MIN} = 30 \text{ mV}$ . Nespornou výhodou je také to, že obvod je schopen zpracovávat napětí o obou polaritách. Není tedy nutné předem znát polaritu teplotního diferenciálu přiváděnou na Peltierův článek. Je tedy teoreticky možné získat větší množství energie z okolí. Lze totiž plně využít přirozeného cyklu přírody. Jedná se především o střídání dne a noci.

### 11.1 Popis měniče

Navržený obvod vychází z doporučení výrobce. Tomu odpovídají i hodnoty zvolených součástek. DPS je koncipována tak, aby mohla být případně použita v reálné aplikaci nebo při experimentálním vyhodnocování.

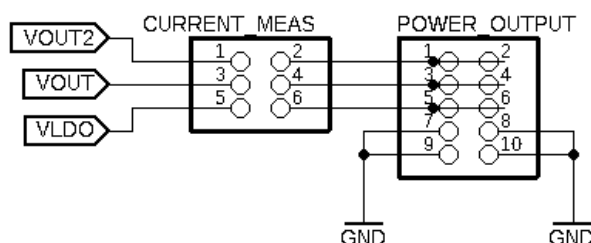
Vstup desky tvoří svorka TEG\_INPUT s kondenzátorem C3, připojeným k primárním cívkám transformátoru T1 a T2. Poměr vinutí cívek je zvolen 1:100, vzhledem k možnosti získávání energie ze zdrojů s napětím od 30 mV [26]. Je možné použít také vinutí 1:20 (minimální pracovní napětí 40 mV) a 1:50 (minimální pracovní napětí 70 mV) [26]. Spojení T2, C1, C2 a T2, C6, C7 tvoří dva separátní rezonanční obvody. Hodnoty jednotlivých součástek jsou voleny, dle katalogového listu pro schopnost pracovat s velmi nízkými hodnotami vstupních napětí.



Obrázek 48 - Schéma zapojení EHDB\_LTC3109 – vstupní část a měnič

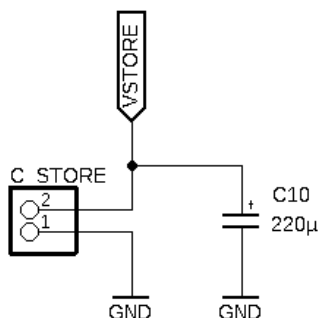
Pro potřeby vyhodnocování a vývoje se jedná především o modifikaci výstupních svorek pro možnost vyvedení různých výstupu, schopnost měření průběhů proudů a napětí pro další použití a ověřování činnosti obvodu měniče v reálných aplikacích. Samotná aplikace není součástí práce. Byl tedy kladen důraz na univerzálnost řešení pro širokou škálu použití a implementací v koncových zařízeních.

Svorkovnice CURRENT\_MEAS je při běžném pracovním provozu zkratována propojkou. Pro případ měření spotřeby připojené aplikace, je ale možné její odstranění a připojení ampérmetru. Svorky POWER\_OUTPUT jsou zdvojené. Lze tedy současně připojit voltmetr pro měření výstupního napětí a vestavěné zařízení.



Obrázek 49 - Schéma zapojení EHDB\_LTC3109 – výstupní a měřící piny

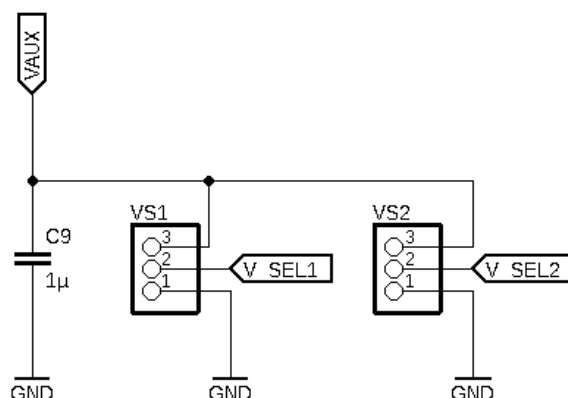
Akumulační prvek je možné připojit na svorky C\_STORE. Modul je již vybaven superkondenzátorem C10. Lze jej ale doplnit o další superkondenzátor nebo obvod zajišťující nabíjení akumulátoru. Při výběru akumulčního prvku je potřeba přihlídnout k hodnotě maximálního výstupního napětí, které činí 5,25 V. Akumulační prvek slouží především k pokrytí příkonových špiček, kdy není z termoelektrického měniče přiváděn dostatek energie na vstup DC-DC měniče.



Obrázek 50 - Schéma zapojení EHDB\_LTC3109 – výstup pro kondenzátor



Pro volbu výstupního napětí jsou použity konfigurační svorky VS1 a VS2. Vhodným propojením pinů je možné nastavit výstupní napětí V<sub>OUT</sub> a V<sub>OUT2</sub>. V následující tabulce jsou popsány jednotlivé možné konfigurace výstupního napětí.

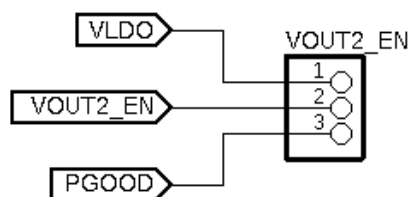


Obrázek 51 - Schéma zapojení EHDB\_LTC3109 – konfigurace hod. napětí V<sub>OUT</sub> a V<sub>OUT2</sub>

Tabulka 6 - Možné konfigurace výstupního napětí dle propojení VS1 a VS2

V <sub>OUT</sub> [V]	VS1	VS2
2,35	V-G	V-G
3,3	V-G	A-V
4,1	A-V	V-G
5	A-V	A-V

Deska měniče disponuje také svorkovnicí s přivedenými ovládacími piny. Svorkovnicí V<sub>OUT2</sub>\_EN je možné ovládat výstup V<sub>OUT2</sub>. Propojením VLDO a V<sub>OUT2</sub>\_EN dojde k trvalému sepnutí V<sub>OUT2</sub>\_EN. Propojením PGOOD a V<sub>OUT2</sub>\_EN je dosaženo spínání výstupu V<sub>OUT2</sub> při dosažení 92,5 % hodnoty nastaveného výstupního napětí V<sub>OUT</sub> [26].



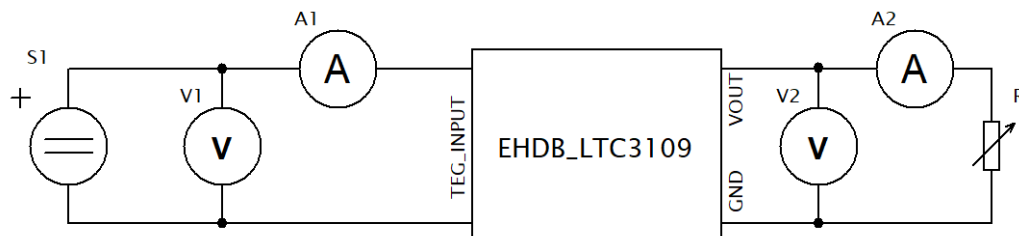
Obrázek 52 - Schéma zapojení EHDB\_LTC3109 – konfigurace spínání výstupu V<sub>OUT2</sub>

Spínání výstupu V<sub>OUT2</sub> je možné také provádět pomocí vestavěné aplikace svorkovnic IC\_SIGNALS. Zde je opět přítomen vstup V<sub>OUT2</sub>\_EN. Přivedením napěťového signálu 1 V, lze dosáhnout spínání výstupu dle požadavků vestavěné aplikace. Ke svorkovnici je také přiveden signál PGOOD poskytující informaci o dosažení zvoleného výstupního napětí V<sub>OUT</sub>.



## 11.2 Měření na měniči

Ověření činnosti DC-DC měniče probíhalo pomocí připojení modulu s LTC3109 k laboratornímu zdroji Agilent E3634. Pomocí něj je postupně nastavováno napětí v rozmezí 30–150 mV. Toto je ověřováno pomocí proudové sondy V1 osciloskopu Keysight MSOS104A. Vstupní proud je měřen proudovou sondou N2820A. Výstupní hodnoty měniče jsou měřeny proudovou sondou V2, také připojenou k osciloskopu a proud výstupu ověřován DMM Agilent 34401A.



Obrázek 55 - Schéma měřicího řetězce

Toto měření má především charakter ověření funkčnosti modulu. Jelikož probíhalo měření pomocí laboratorního zdroje, jsou hodnoty vstupního příkonu DC-DC měniče vyšší. Účinnost přeměny dosáhla největší efektivity v 60 mV vstupního napětí.

Dle katalogových listů výrobce by na měřeném rozsahu měl dosahovat nejvyšší účinnosti blížící se 28 % v okolí napájecího napětí 70 mV. Výrobce ovšem prováděl měření při dodržení optimálního vstupního odporu a s výstupním napětím  $V_{OUT} = 0$  V. Pro potřeby tohoto měření byla výstupní napětí  $V_{OUT} = 2,35$  V a nebyl vhodně přizpůsoben odpor laboratorního zdroje.

Na výstupu byl zatěžován proměnným odporem R. Jeho hodnota je postupně snižována, dokud nedojde k poklesu napětí výstupu pod hranici 2,3 V. V případě měřených hodnot 30–50 mV je patrné, že měnič nebyl schopen dosáhnout požadované hodnoty výstupního napětí ani se zatěžovacím odporem v řádech MΩ.

Následně proběhlo ověření startovacího napětí měniče. To je průběžně měněno v rozsahu 20–40 mV. Spolehlivého výstupního napětí s hodnotou alespoň 1,8 V je schopen měnič dosáhnout až od hodnoty startovacího napětí 33 mV. Po dosažení této hodnoty je ještě schopen měnič pracovat až do 25 mV. Zde ovšem probíhalo měření bez zátěže, bylo měřeno pouze výstupní napětí.

Tabulka 7 - Měřené hodnoty měniče LTC3109

$U_{\text{nap}}$ [mV]	$I_{\text{primRMS}}$ [mA]	$U_{\text{sekRMS}}$ [mV]	$f_{\text{sek}}$ [kHz]	$P_{\text{IN}}$ [μW]	$I_z$ [μA]	$U_{\text{VOUT}}$ [V]	$P_{\text{OUT}}$ [μW]	$\eta$ [%]
30	2,794	865,36	66,127	83,8080	4,22	1,676	7,073	8,44
40	4,000	980,35	58,806	160,004	10,18	1,992	20,280	12,67
50	6,354	1197,56	47,271	317,695	25,32	2,099	53,137	16,73
60	8,153	2202,82	47,845	489,199	38,65	2,283	88,246	18,04
70	10,644	2288,28	44,155	745,052	45,43	2,301	104,534	14,03
80	12,463	2413,85	41,760	997,016	56,34	2,303	129,757	13,01
90	14,524	2563,12	38,958	1307,142	71,38	2,283	162,975	12,47
100	16,300	2747,91	37,877	1630,020	86,31	2,285	197,227	12,10
110	18,437	2801,26	35,824	2028,081	107,88	2,284	246,344	12,15
120	19,822	3004,14	34,477	2378,580	125,42	2,284	286,409	12,04
130	21,537	3101,92	32,643	2799,771	139,21	2,300	320,197	11,44
140	23,373	3199,83	30,285	3272,220	163,23	2,300	375,413	11,47
150	24,488	3350,16	28,711	3673,215	183,25	2,302	421,860	11,48

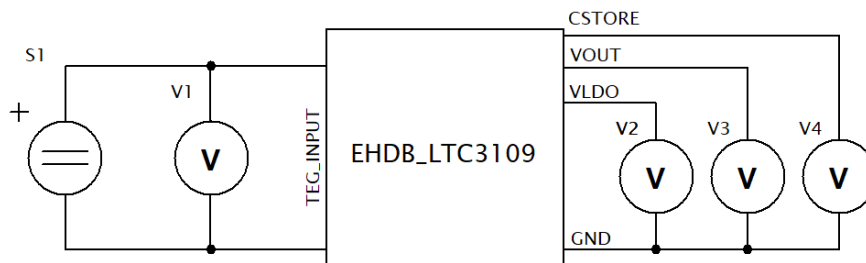
Vzhledem k tomu, že první měření nezohledňuje vnitřní odpor TEG a proud do měniče není nijak omezen, bylo provedeno experimentální ověření efektivity přeměny elektrické energie z testovaného TEG (TEC1-12706). Schéma měřicího řetězce je totožné jako u předešlého měření. Pro měření byly ale použity měřicí přístroje V1, V2, A2 – UNI-T UT131D, A1 – CEM DT-61. Měření bylo prováděno pro hodnotu výstupního napětí  $V_{\text{OUT}} = 2,35$  V. Zatěžovací odpor byl nastaven tak, aby výstup měniče byl schopen udržet nastavenou hodnotu napětí.

Efektivita přeměny energie v měniči se pohybuje mezi 8,78 – 24,07 %. Výrobce deklaruje pro použitý transformátor s poměrem vinutí 1:100 účinnost v rozmezí 3–28 % (bipolární provoz). Toto měření se tedy více blíží k deklarovaným hodnotám uváděným výrobcem. Nízká efektivita přeměny je dána především ztrátami na vstupních transformátorech a usměrňováním vstupního napětí z rezonančního obvodu.

Tabulka 8 - Opakované měření s reálným měničem

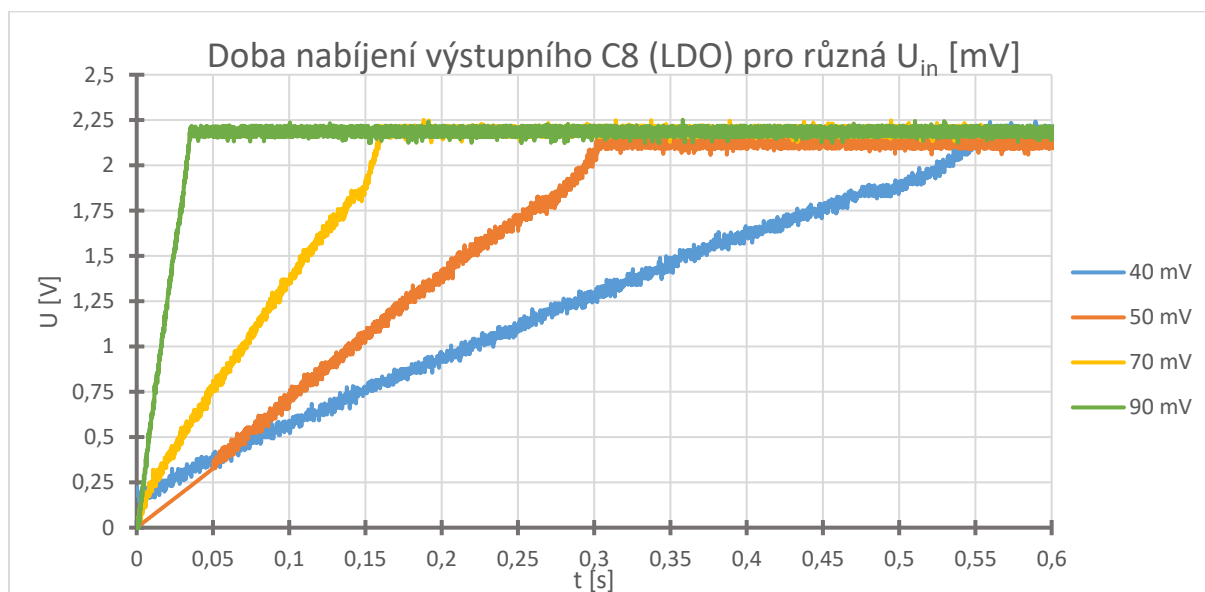
$U_{\text{nap}}$ [mV]	$I_{\text{primRMS}}$ [mA]	$P_{\text{IN}}$ [μW]	$U_{\text{VOUT}}$ [V]	$I_z$ [μA]	$P_{\text{OUT}}$ [μW]	$\eta$ [%]
30	2,84	85,2	2,35	5,4	12,69	14,89
40	4,01	160,4	2,35	14,3	33,61	20,95
50	5,57	278,5	2,35	27,1	63,69	22,87
60	7,03	421,8	2,35	43,2	101,52	24,07
70	8,30	581,0	2,35	44,2	103,87	17,88
80	9,37	749,6	2,35	49,2	115,62	15,42
90	10,91	981,9	2,35	60,3	141,71	14,43
100	12,31	1231,0	2,35	76,3	179,31	14,57
110	13,01	1431,1	2,35	81,0	190,35	13,30
120	13,91	1669,2	2,35	82,0	192,70	11,54
130	15,24	1981,2	2,35	91,0	213,85	10,79
140	16,86	2360,4	2,35	92,2	216,67	9,18
150	17,69	2653,5	2,35	99,1	232,89	8,78

Pro zjištění doby nabíjení jednotlivých výstupů bylo realizováno měření s použitím původního laboratorního zdroje, nastaveného v módu konstantního napětí. Pro zaznamenání hodnoty byly použity napěťové sondy osciloskopu Keysight MSOS104A, znázorněné na schématu měření na následujícím obrázku jako „V1 – V4“.



Obrázek 56 - Schéma zapojení pro měření výstupních napětí a napětí uložště

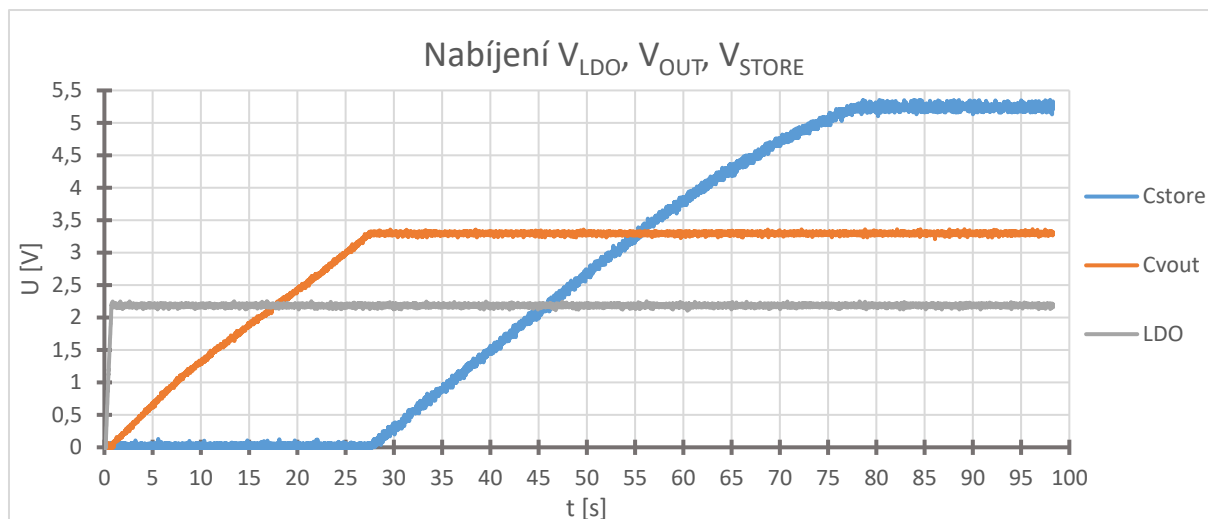
Z grafu jsou patrné doby dosažení potřebného výstupního napětí lineárního regulátoru, pro jednotlivé zvolené hodnoty vstupního napětí. Výstup lineárního regulátoru je napájen přednostně. Výrobce měniče doporučuje k tomuto výstupu připojit především MCU. Ostatní snímače a komunikační moduly je možné připojit k výstupu  $V_{OUT}$  a  $V_{OUT2}$ . Se zvyšujícím se vstupním napětím doba nabíjení výstupního kondenzátoru C8 klesá dle předpokladů.



Obrázek 57 - Doba nabíjení výstupu  $V_{LDO}$

Následující měření proběhlo se vstupní hodnotou napětí 50 mV a ilustruje postupné nabíjení jednotlivých výstupních akumulčních prvků.

Nejdříve dochází k nabíjení výstupu VLDO, po úplném nabití následuje výstup VOUT. V případě že došlo k nabití všech výstupu a došlo k jejich regulaci na požadovanou hodnotu, začne integrovaný obvod nabíjet akumulční prvek připojený k výstupu C\_STORE. Pořadí v případě vybíjení je opačné.



Obrázek 58 - Nabíjení jednotlivých výstupů a akumulčních prvků

## 12 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo především bližší seznámení s oblastí získávání energie. Jako zdroj energie je diskutováno především teplo, možnost využití odpadního tepla a přirozeného teplotního diferenciálu mezi různými prostředími. Cílem je zajistit napájení nízko-odběrového vestavěného zařízení a dosažení jeho energetické nezávislosti.

Jako vhodný termoelektrický měnič je blíže popsán Peltierův článek, včetně základních fyzikálních principů jeho činnosti. Při výběru měniče je nutné dbát na co nejvyšší hodnotu Seebeckova napětí. Je zde také diskutován rozdíl mezi TEC a TEG. Zde nebyl shledán žádný podstatný rozdíl z hlediska výroby elektrické energie s využitím nízkých teplotních diferenciálů.

Byla provedena rešerše základních prvků umožňující ukládání získané energie z měniče. Zde se jako vhodný prvek, vzhledem k předpokládaným energetickým ziskům, jeví jako nejvhodnější superkondenzátory, a to zejména díky životnosti a odolnosti v cyklickém provozu.

Alternativně lze také využít Li-ion článku nebo zmíněných Solid-state baterií. Jejich použití je ale značně limitováno nízkou životností, zatížitelností a případnou cenou implementace.

Pro přeměnu získané elektrické energie byl zvolen integrovaný obvod LTC3109. Jeho hlavní předností je možnost přeměny elektrické energie v bipolárním provozu. Nezáleží tedy na smyslu přiváděného napětí. Účinnost tohoto DC-DC měniče je závislá na hodnotě vstupního napětí a vnitřním odporu termoelektrického měniče. Při měření s TEC1 – 12706 se pohybovala v rozmezí 8,78 – 24,07 %.

Pro funkčnost připojeného vestavěného systému je tedy potřeba teplotního diferenciálu přibližně 1 – 1,4 °C. Tyto hodnoty platí pro měřený článek TEC1-12706. V tomto rozmezí je výstup DC-DC měniče s nastaveným napětím 2,35 V schopen poskytnout výkon 7,073 – 12,69  $\mu$ W.

Hlavním výsledkem práce je především testovací přípravek se sadou měřených charakteristik vybraného TEG. Tento přípravek může být dále využit pro srovnávání různých TEG, zjišťování výtěžnosti z daného termoelektrického měniče a ověřování specifických použití s vestavěným zařízením. Přínosem je především měření výtěžnosti termoelektrického měniče v oblasti velmi nízkých teplotních diferenciálů, kdy pro tyto hodnoty nejsou obvykle dostupné měřené charakteristiky výrobce, případně s mnohem většími teplotními diferenciály. Tímto lze docílit vhodného výběru měniče pro specifickou aplikaci.

## Literatura

- [1] PRIYA, Shashank a Daniel J. INMAN. *Energy Harvesting Technologies* [online]. New York: Springer, 2009 [cit. 2020-12-05]. ISBN 978-0-387-76464-1. Dostupné z: 10.1007/978-0-387-76464-1
- [2] TANG, Xiaoli, Xianghong WANG, Robert CATTLEY, Fengshou GU a Andrew BALL. *Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review*. In: Sensors [online]. 2018 [cit. 2021-02-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s18124113
- [3] *Introduction to Energy Harvesting Technology* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://training.ti.com/introduction-energy-harvesting-technology>
- [4] SAINTHIYA, Himanshu a Narendra S. BENIWAL. *Different types of cooling systems used in photovoltaic module solar system: A review*. 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET) [online]. IEEE, 2017, 2017, 1500-1506 [cit. 2021-02-24]. ISBN 978-1-5090-4442-9. Dostupné z: doi:10.1109/WiSPNET.2017.8300012
- [5] *Energy Harvester ECO 200* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: [https://www.enocean.com/en/products/enocean\\_modules\\_902mhz/eco-200/](https://www.enocean.com/en/products/enocean_modules_902mhz/eco-200/)
- [6] KIZIROGLOU, M E, S W WRIGHT, M SHI, D E BOYLE, Th BECKER, J W EVANS a E M YEATMAN. *Milliwatt Power Supply by Dynamic Thermoelectric Harvesting*. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. ASEE Conferences, 2019, 2017, 1407, 25.1049.1-25.1049.12 [cit. 2021-02-25]. ISBN 978-1-5090-4860-1. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1407/1/012098
- [7] *Thermoelectric Technical Reference: Introduction to Thermoelectric Cooling* [online]. USA: Ferrotec, c2001-2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref01/>
- [8] *Seebeckův jev* [online]. c2006-2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [9] *Thomsonův jev* [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>
- [10] *General Purpose Thermocouples* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.tc.co.uk/thermocouples/basic-thermocouple.html>
- [11] NESARAJAH, Marco a Georg FREY. *Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator*. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [online]. IEEE, 2016, 2016, 4252-4257 [cit. 2021-03-03]. ISBN 978-1-5090-3474-1. Dostupné z: doi:10.1109/IECON.2016.7793029



- [12] PARADISO, J.A. a T. STARNER. *Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics*. IEEE Pervasive Computing [online]. 2005, 4(1), 18-27 [cit. 2021-03-22]. ISSN 1536-1268. Dostupné z: doi:10.1109/MPRV.2005.9
- [13] HUANG, Yongsheng, Daochun XU, Jiangming KAN, Wenbin LI, Deepa MADAN, J W EVANS a E M YEATMAN. *Study on field experiments of forest soil thermoelectric power generation devices*. PLOS ONE [online]. ASEE Conferences, 2019, 2017, 14(8), 25.1049.1-25.1049.12 [cit. 2021-02-25]. ISBN 978-1-5090-4860-1. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0221019
- [14] Micropelt: *Energy harvesting - Self-powered Radio control valve* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.micropelt.com/en/energy-harvesting.html>
- [15] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-730-0045-8.
- [16] *Battery University* [online]. Cadex Electronics [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/learn/>
- [17] *Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [18] *SLB08115L140: Small Lithium Ion Rechargeable Battery* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: [https://www.nichicon.co.jp/assets/pdf/products/slb/datasheet0811\\_2010\\_e.pdf](https://www.nichicon.co.jp/assets/pdf/products/slb/datasheet0811_2010_e.pdf)
- [19] *EnerChip™* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.cymbet.com/products/enerchip-overview/>
- [20] *Superkondenzátory: (Elektrochemické kondenzátory)* [online]. 2017 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/6710-superkondenzatory>
- [21] *SPV 1050 - SPV1050 Ultralow power energy harvester and battery charger* [online]. STMicroelectronics, 2018 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf>
- [22] *AEM20940 - Highly-efficient, regulated dual-outputs, ambient energy manager for TEG with optional primary battery* [online]. Belgie: E-PEAS, 2018 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: [https://e-peas.com/wp-content/uploads/2020/04/E-peas\\_Thermal\\_Energy\\_Harvesting\\_AEM20940\\_Datasheet.pdf](https://e-peas.com/wp-content/uploads/2020/04/E-peas_Thermal_Energy_Harvesting_AEM20940_Datasheet.pdf)
- [23] *MAX17710 Energy-Harvesting Charger and Protector* [online]. San Jose (USA): Maxim Integrated, 2012 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17710.pdf>
- [24] *BQ25505* [online]. Dallas: Texas Instruments, 2013 [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf?ts=1606298154103&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf?ts=1606298154103&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [25] *LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager* [online]. Norwood: Analog Devices, 2019 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>

- [26] *LTC3109 Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager* [online]. Milpitas: Linear technology, 2010 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3109fb.pdf>
- [27] *Pt1000: NB-PTCO-154* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=PTF-FAMILY&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=NB-PTCO-154>
- [28] *Single Stage TEC (Thermoelectric Coolers) - RC12-8* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://ii-vi.com/product/single-stage-thermoelectric-coolers/>
- [29] O'HALLORAN, Steven a Matthew RODRIGUES. *Power and Efficiency Measurement in a Thermoelectric Generator*. 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST) [online]. ASEE Conferences, 2012, 2017, 25.1049.1-25.1049.12 [cit. 2021-02-25]. ISBN 978-1-5090-4860-1. Dostupné z: doi:10.18260/1-2—21806
- [30] ABDAL-KADHIM, Ali Mohammed a Kok Swee LEONG. *Application of thermal energy harvesting from low-level heat sources in powering up WSN node*. 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST) [online]. IEEE, 2017, 2017, 131-135 [cit. 2021-02-25]. ISBN 978-1-5090-4860-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICFST.2017.8210489

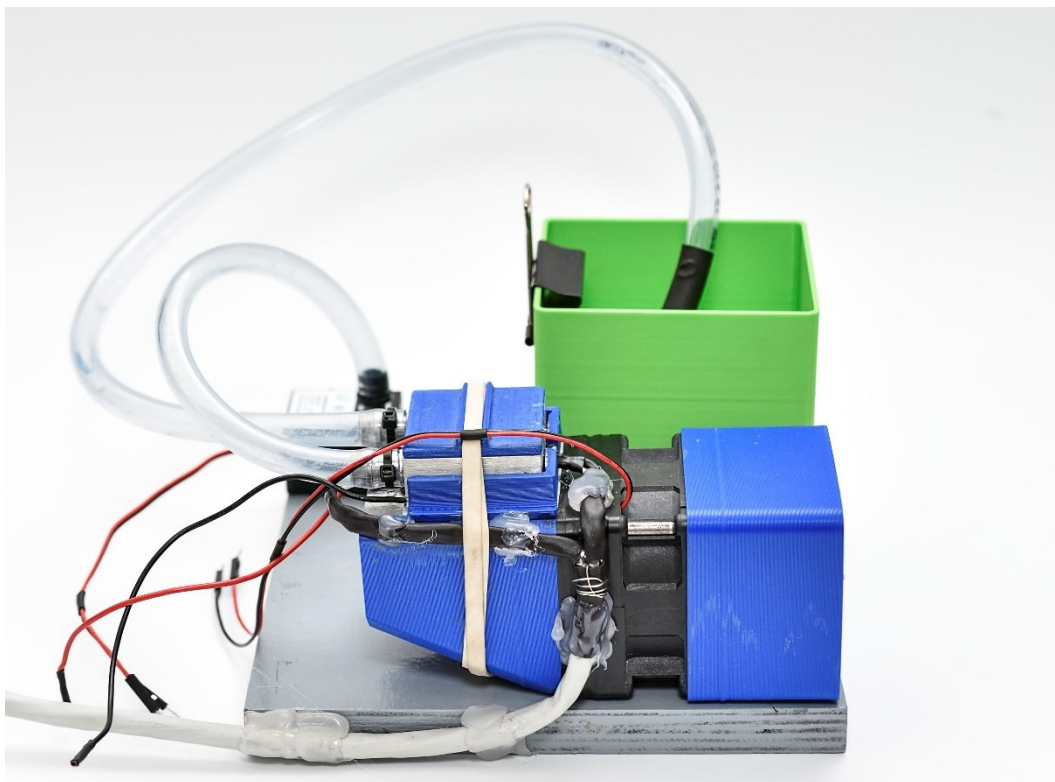
## Seznam příloh

- I. Obsah příloh v digitálním repozitáři
- II. Fotodokumentace přípravku pro měření TEG
- III. Program LabVIEW
- IV. Měřené charakteristiky TEC1-12706
- V. Technická dokumentace modulu měniče s LTC3109

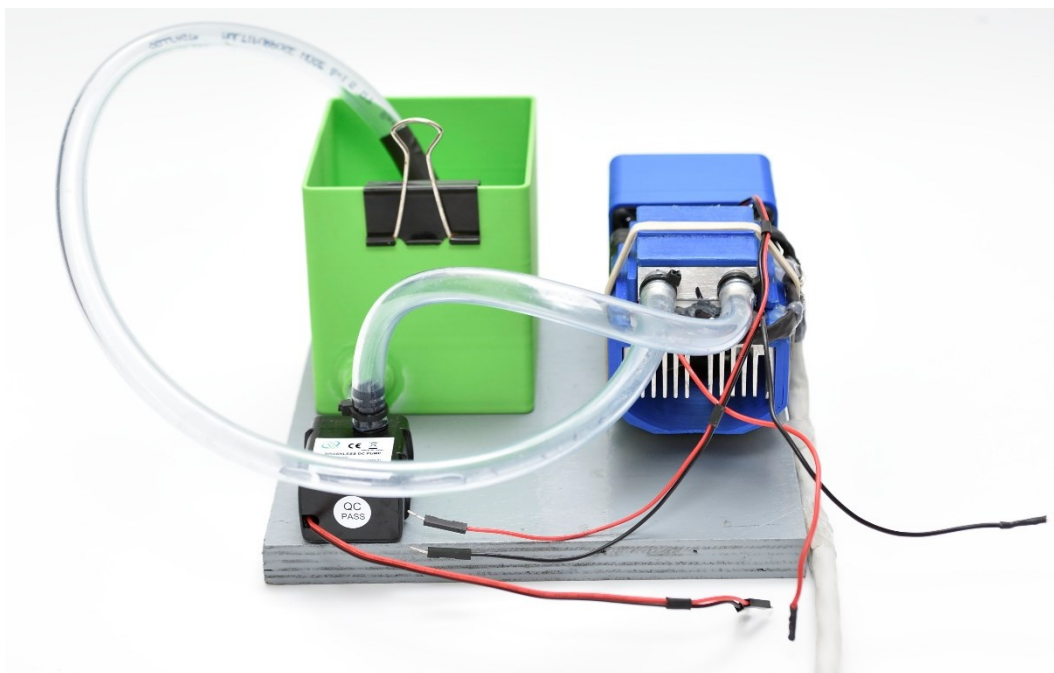
## **I. Obsah příloh v digitálním repositáři**

- Komponenty měřícího přípravku
- Program pro měření TEG v LabVIEW - „Měření TEG – BAN0044“
- Naměřená a upravená data
- Podklady DPS – EHDB\_LTC3109
- Výrobní data DPS – EHDB\_LTC3109
- Měření DPS – EHDB\_LTC3109
- Technická dokumentace výrobce k měniči LTC3109
- Technická dokumentace výrobce k TEC1-12706
- Fotodokumentace

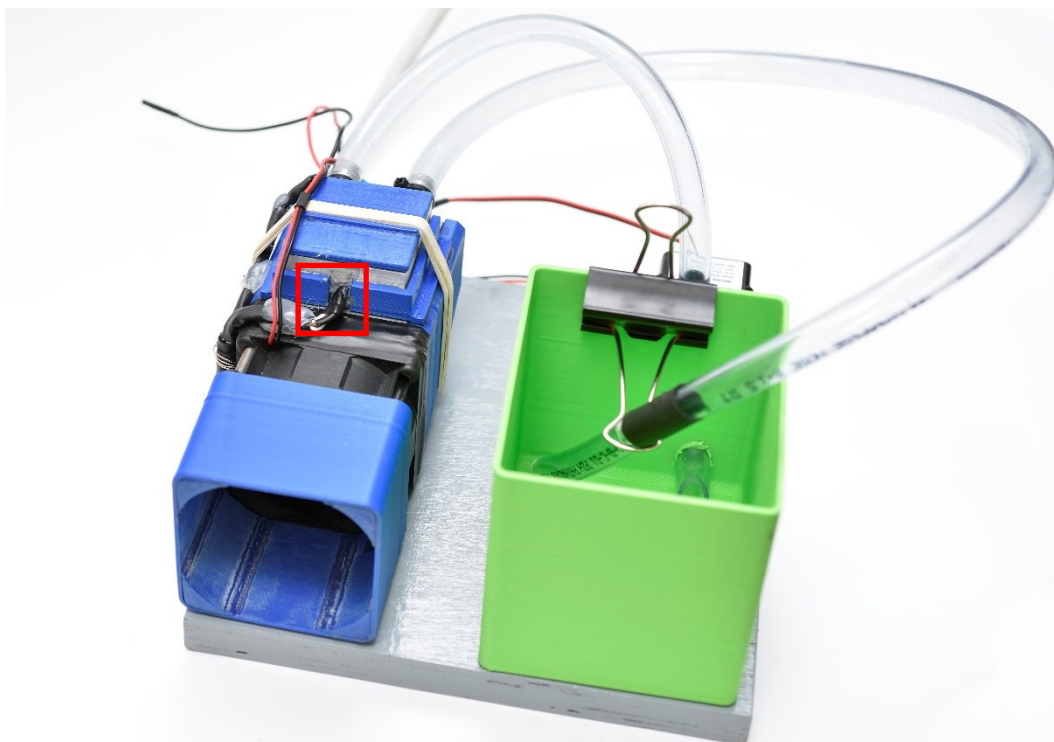
## II. Fotodokumentace přípravku pro měření TEG



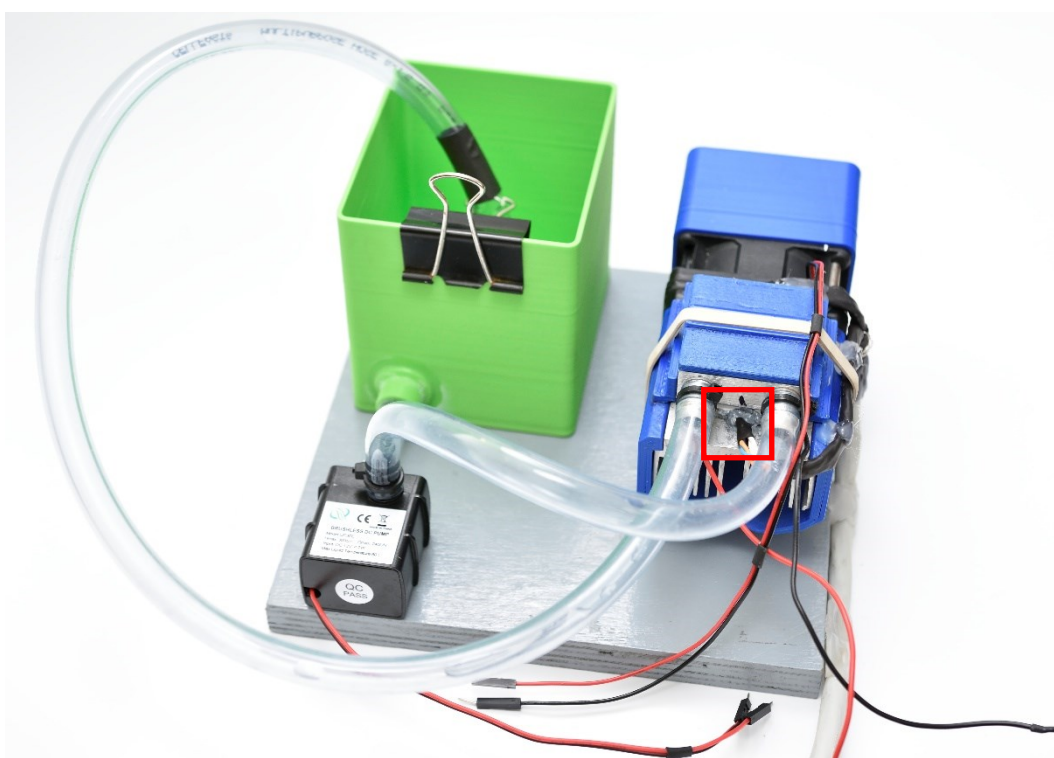
Obrázek přílohy i - Finální přípravek pro měření TEG – pohled na fixaci TEG



Obrázek přílohy ii - Finální přípravek pro měření TEG – nucený oběh média čerpadlem

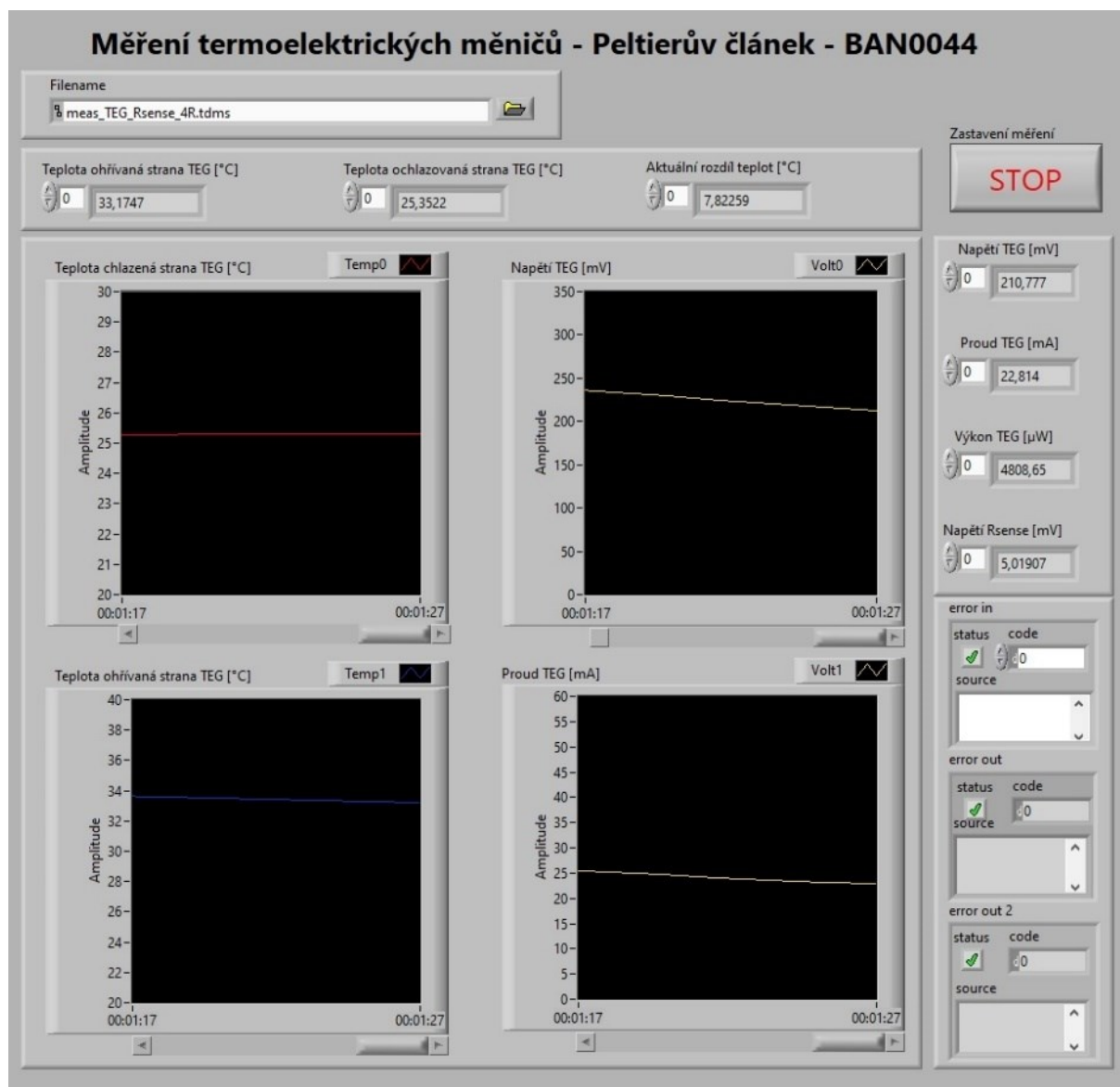


Obrázek přílohy iii - Detail umístění snímače Pt1000 – drážka ve vodním bloku – ohříváná strana

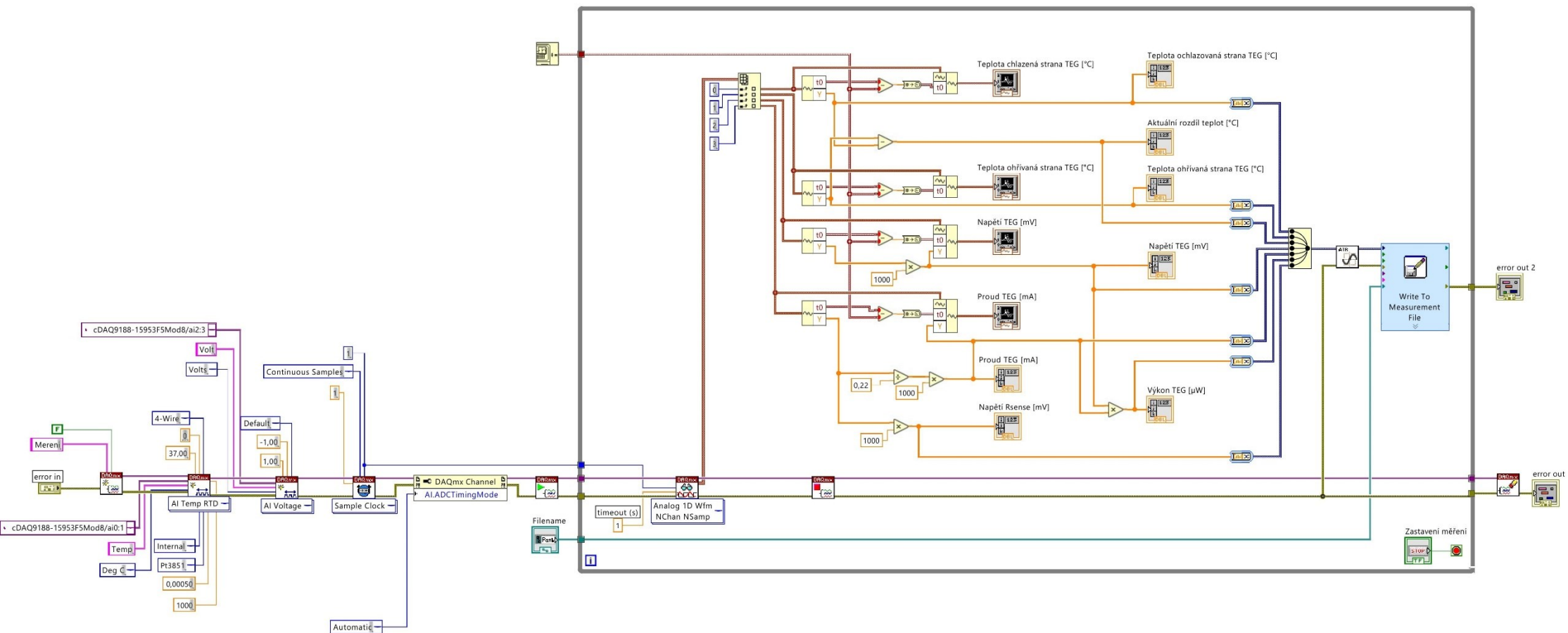


Obrázek přílohy iv - Detail umístění snímače Pt1000 – drážka v chladiči – chlazená strana

### III. Program LabVIEW



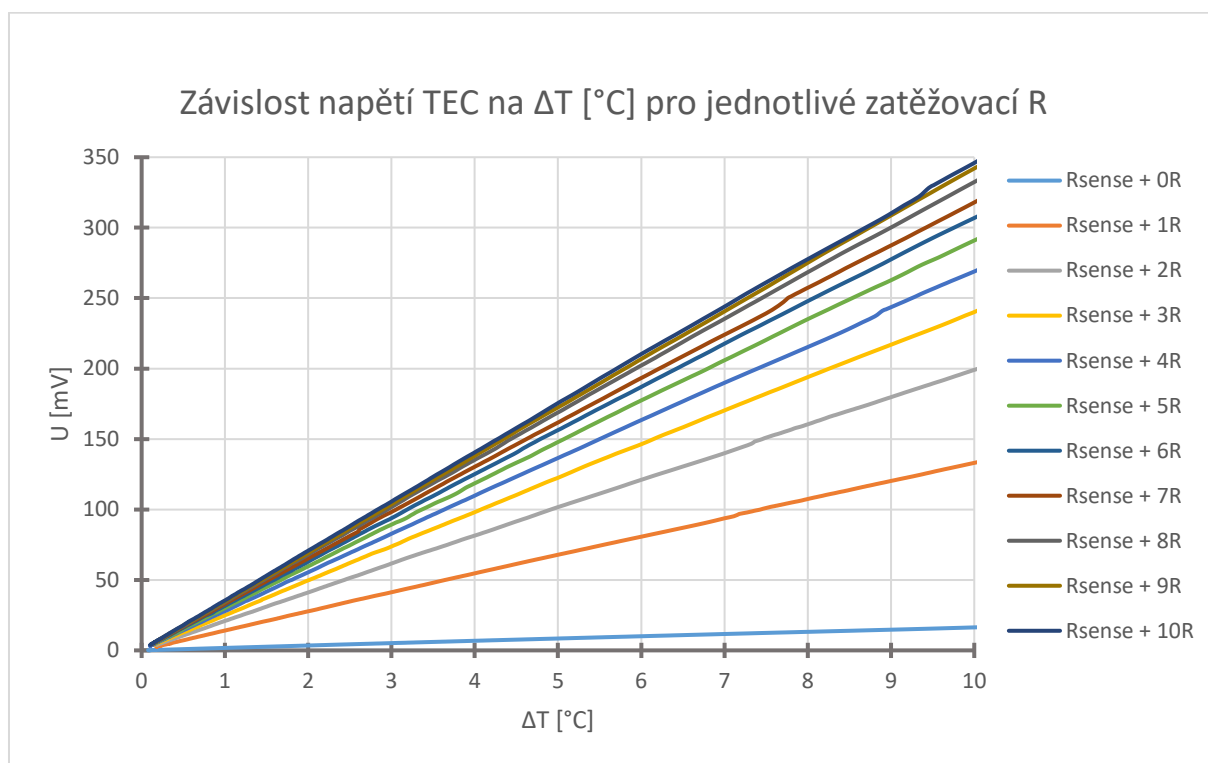
Obrázek přílohy v – Front Panel měřící aplikace TEG v LabVIEW



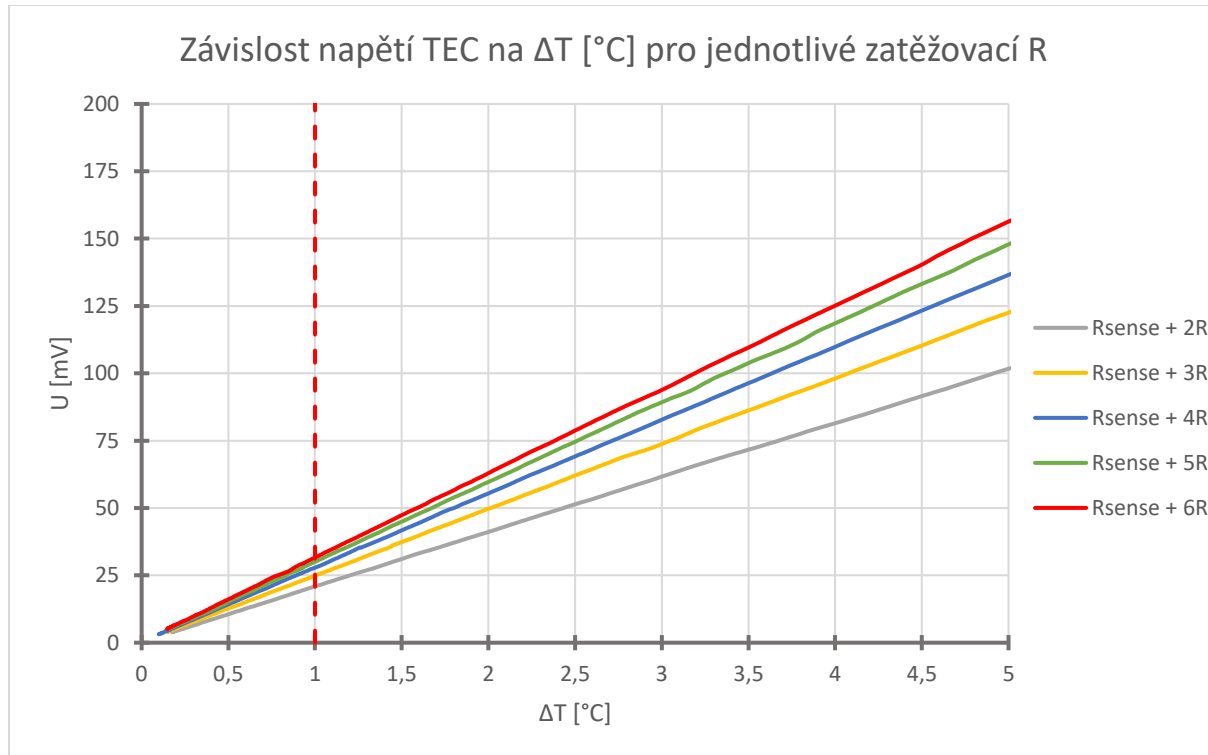
Obrázek přílohy vi – Block diagram měřicí aplikace TEG v LabVIEW



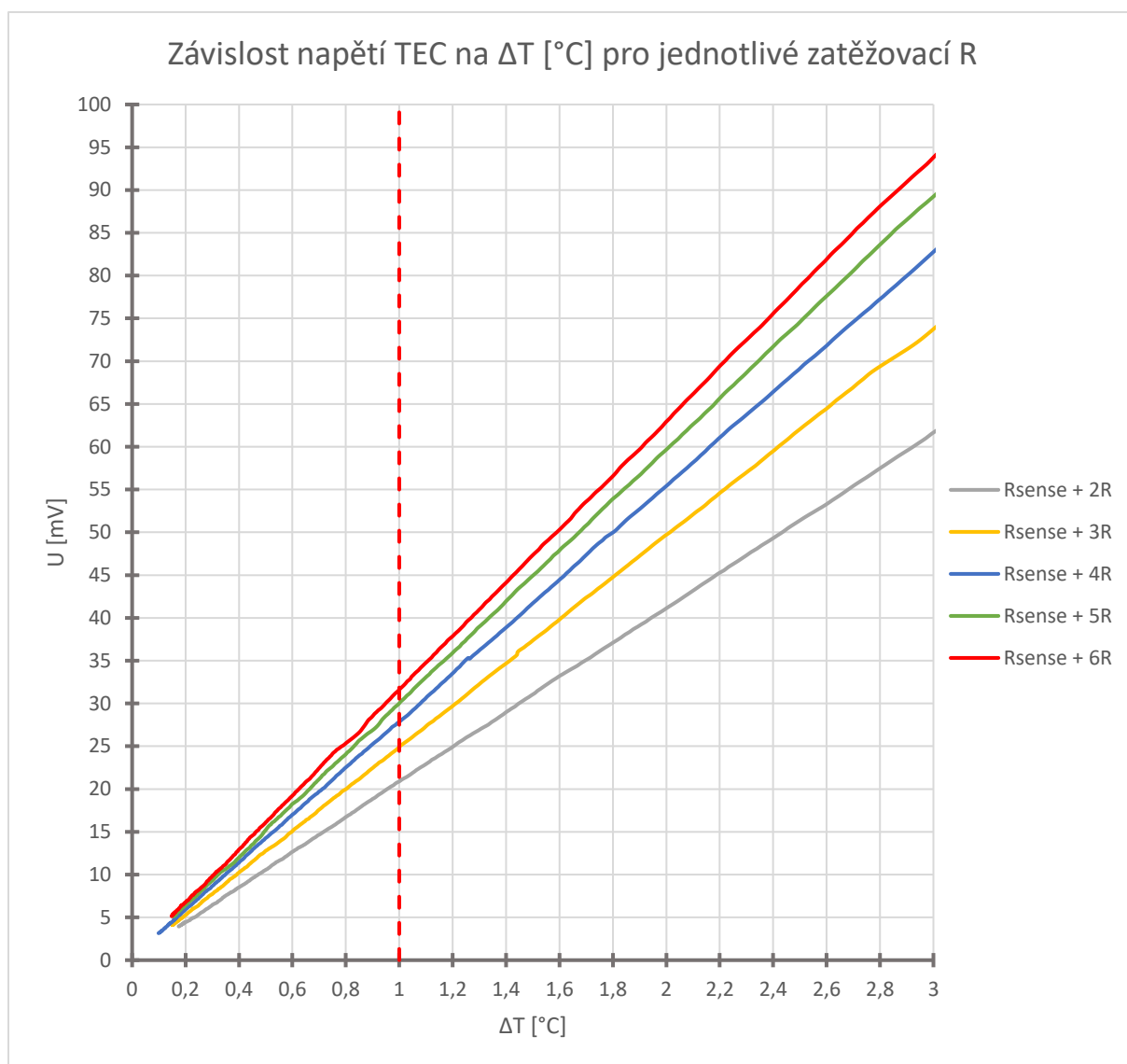
## IV. Měřené charakteristiky TEC1-12706



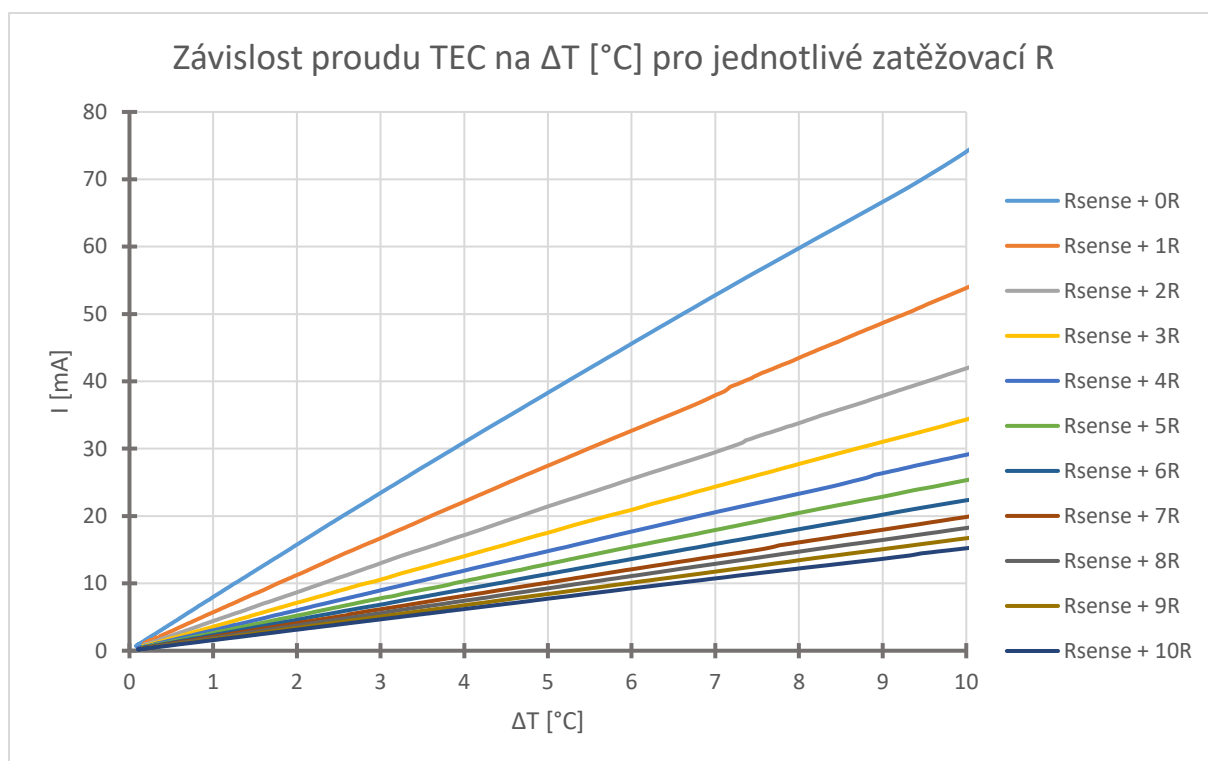
Obrázek přílohy vii - Závislost napětí TEC na  $\Delta T$  [°C]



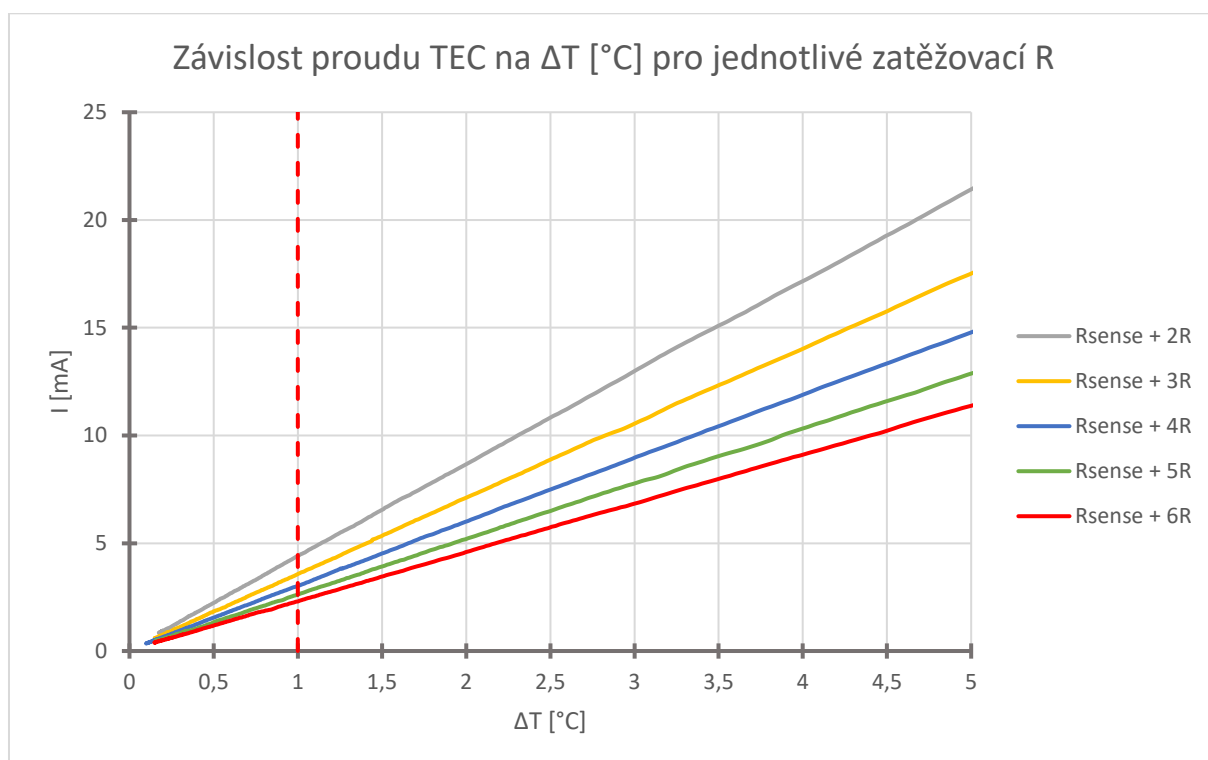
Obrázek přílohy viii – Závislost napětí TEC na  $\Delta T$  [°C] – detail pro vybrané zátěže



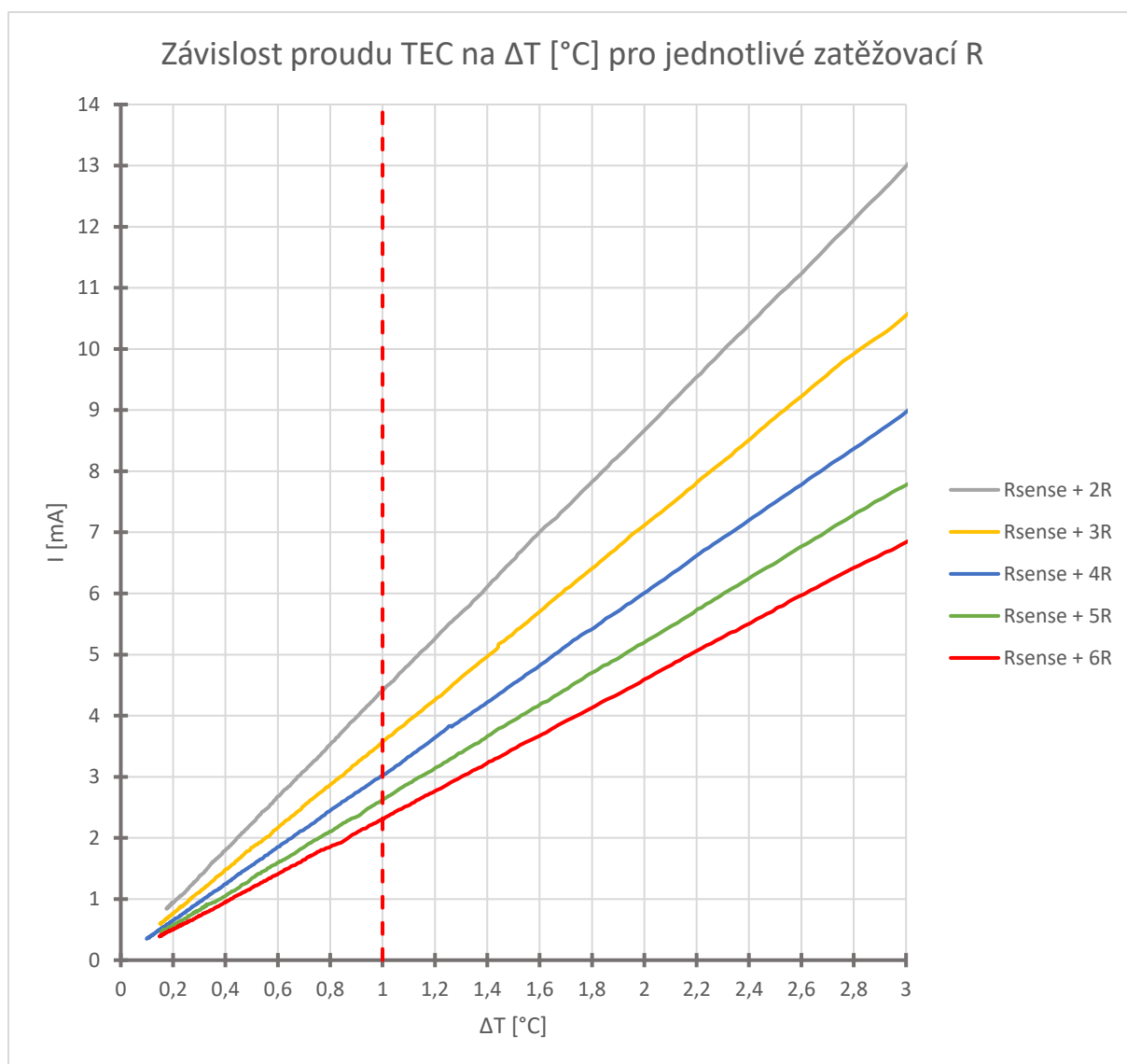
Obrázek přílohy ix - Závislost napětí TEC na  $\Delta T$  [°C] – detail na rozpětí 0–3 °C



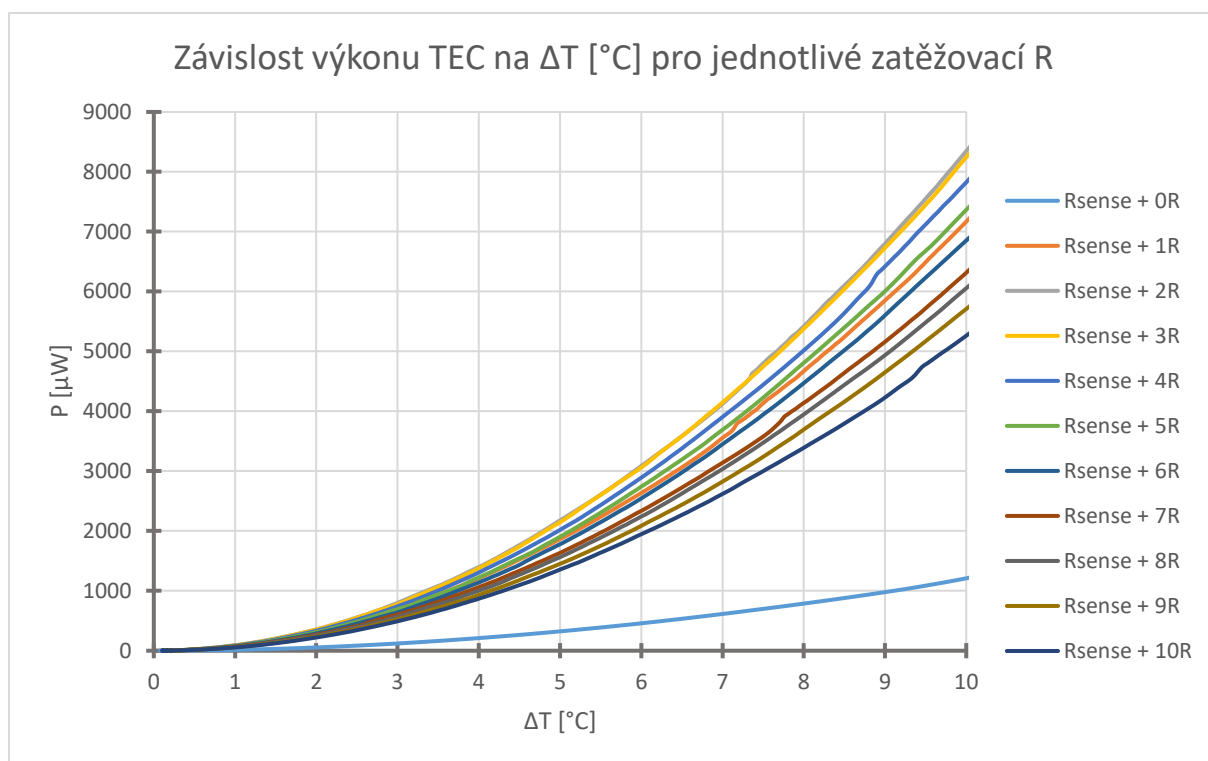
Obrázek přílohy x - Závislost proudu TEC na  $\Delta T$  [°C]



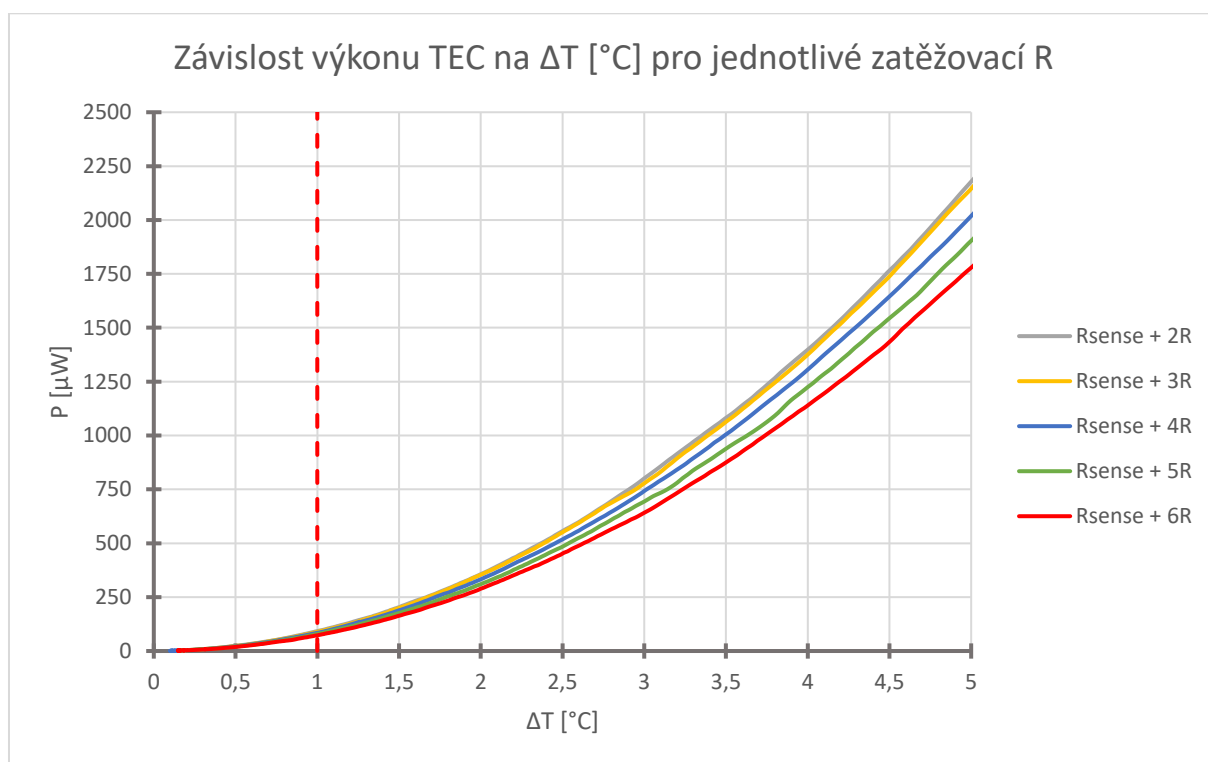
Obrázek přílohy xi - Závislost proudu TEC na  $\Delta T$  [°C] – detail pro vybrané zátěže



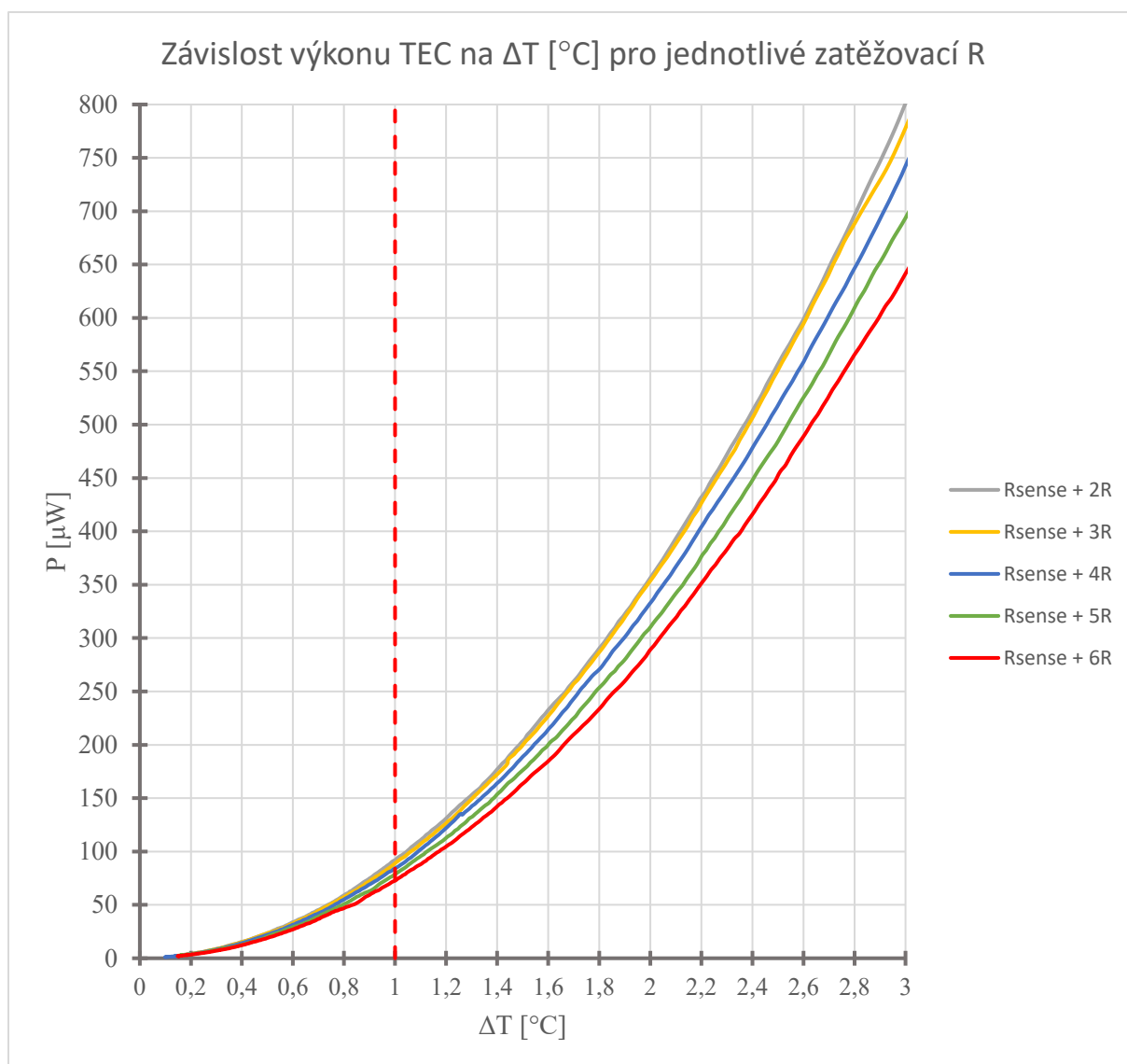
Obrázek přílohy xii - Závislost proudu TEC na  $\Delta T$  [°C] – detail na rozpětí 0–3 °C



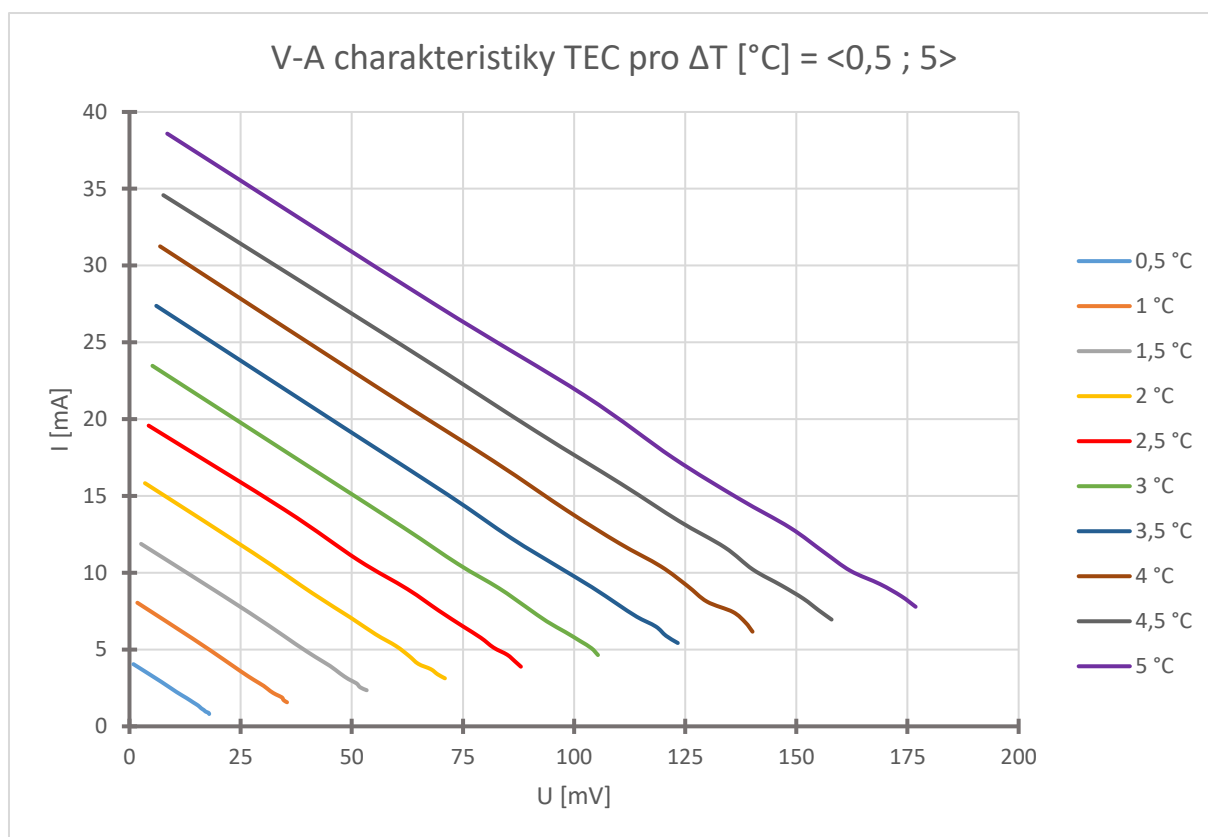
Obrázek přílohy xiii - Závislost výkonu TEC na  $\Delta T$  [°C]



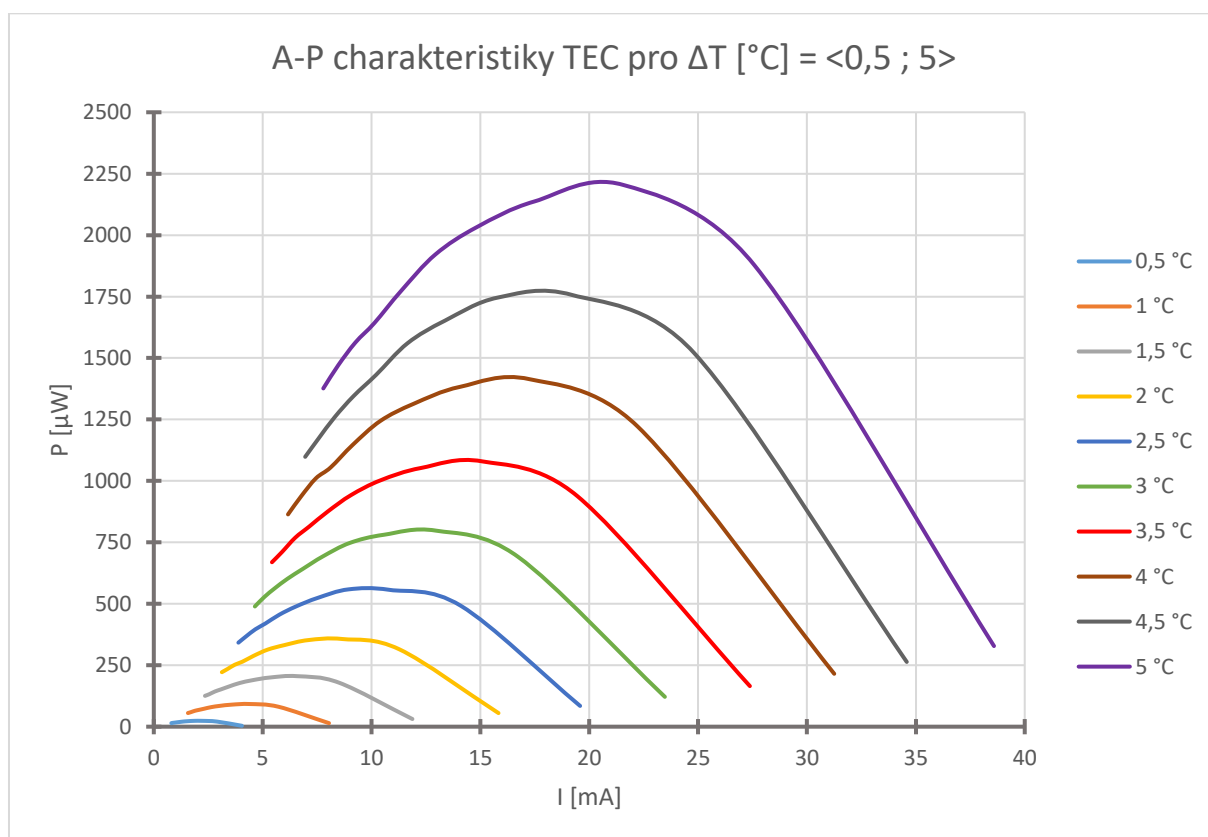
Obrázek přílohy xiv - Závislost výkonu TEC na  $\Delta T$  [°C]



Obrázek přílohy xv - Závislost výkonu TEC na  $\Delta T$  [°C]



Obrázek přílohy xvi - V-A charakteristiky TEC pro  $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$



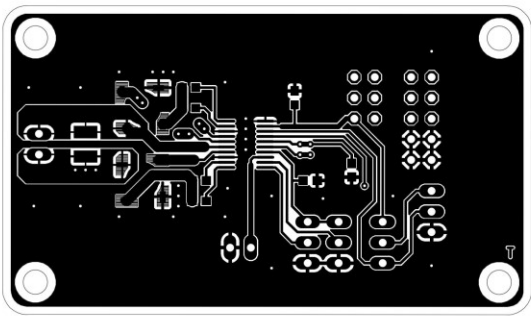
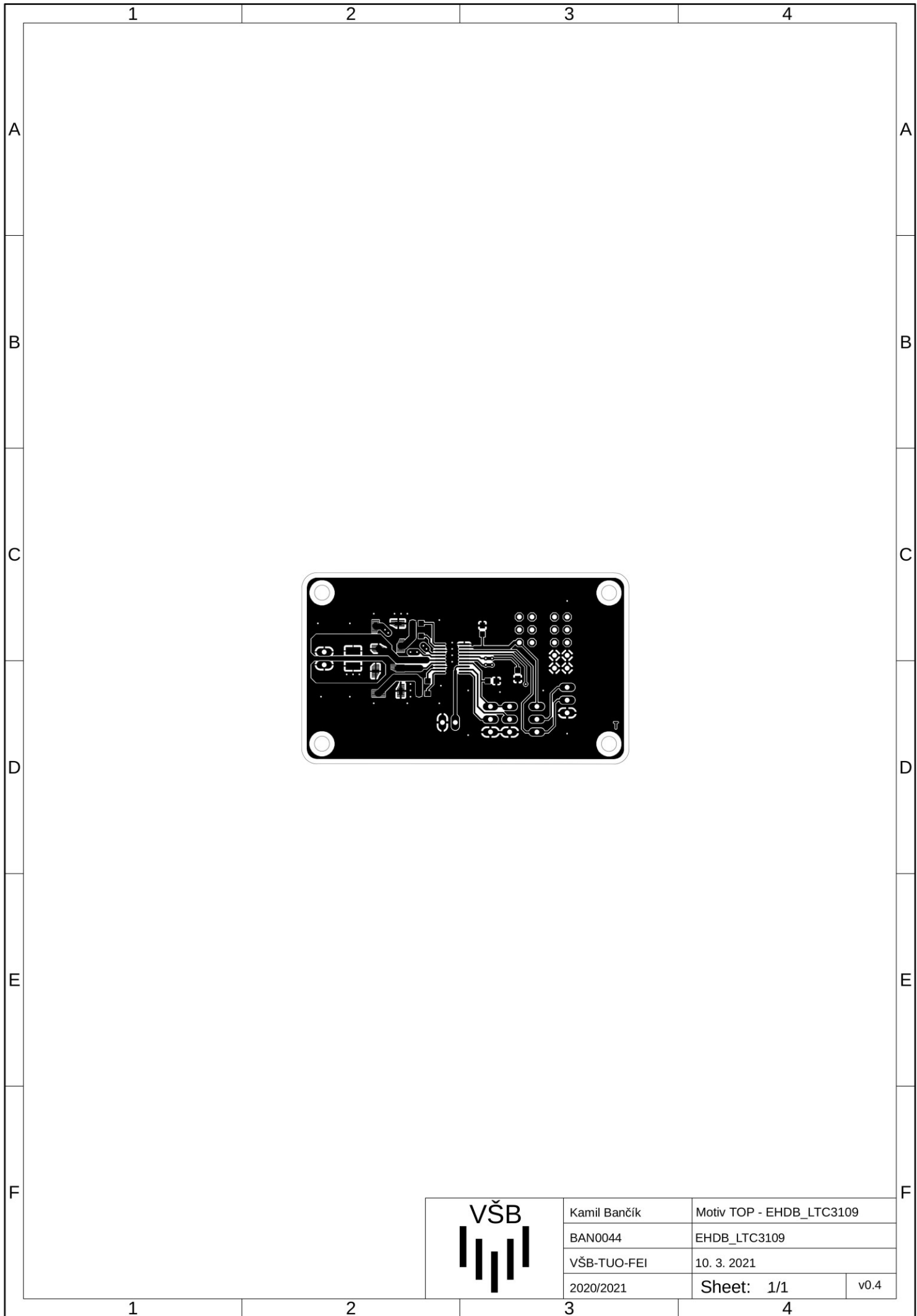
Obrázek přílohy xvii – A-P charakteristiky TEC pro  $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$

## **V. Technická dokumentace modulu měniče s LTC3109**

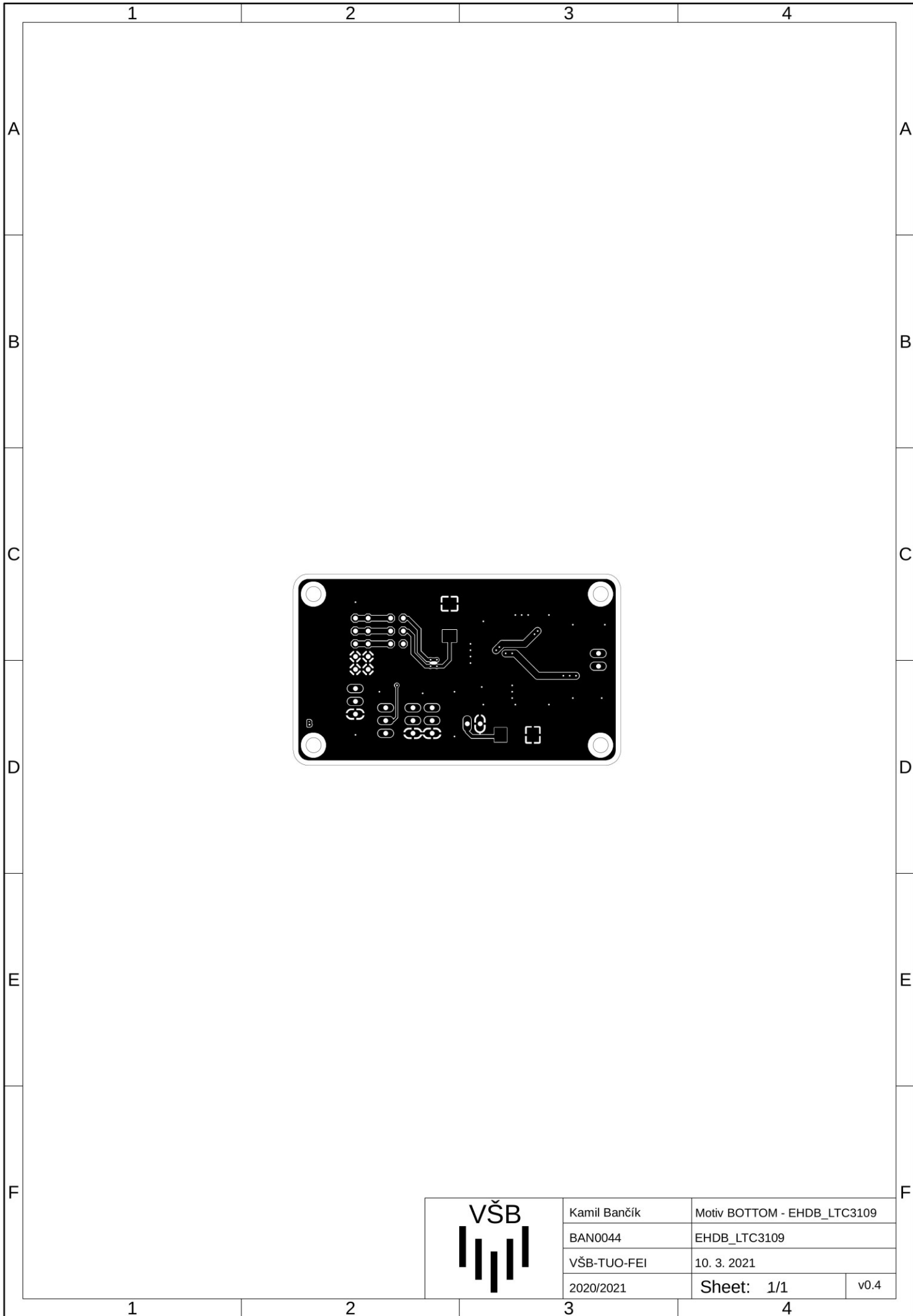
- Schéma zapojení
- Motiv mědi TOP
- Motiv mědi BOTTOM
- Potisk strana TOP
- Osazení součástek TOP
- Osazení součástek BOTTOM
- Vrtání desky
- Seznam součástek



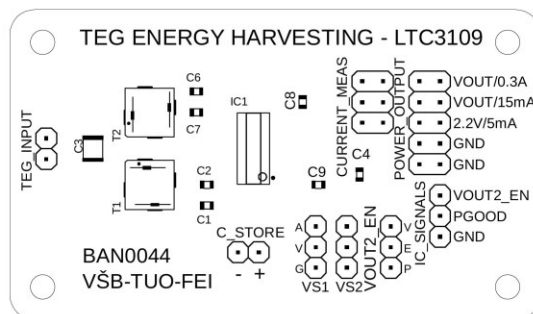




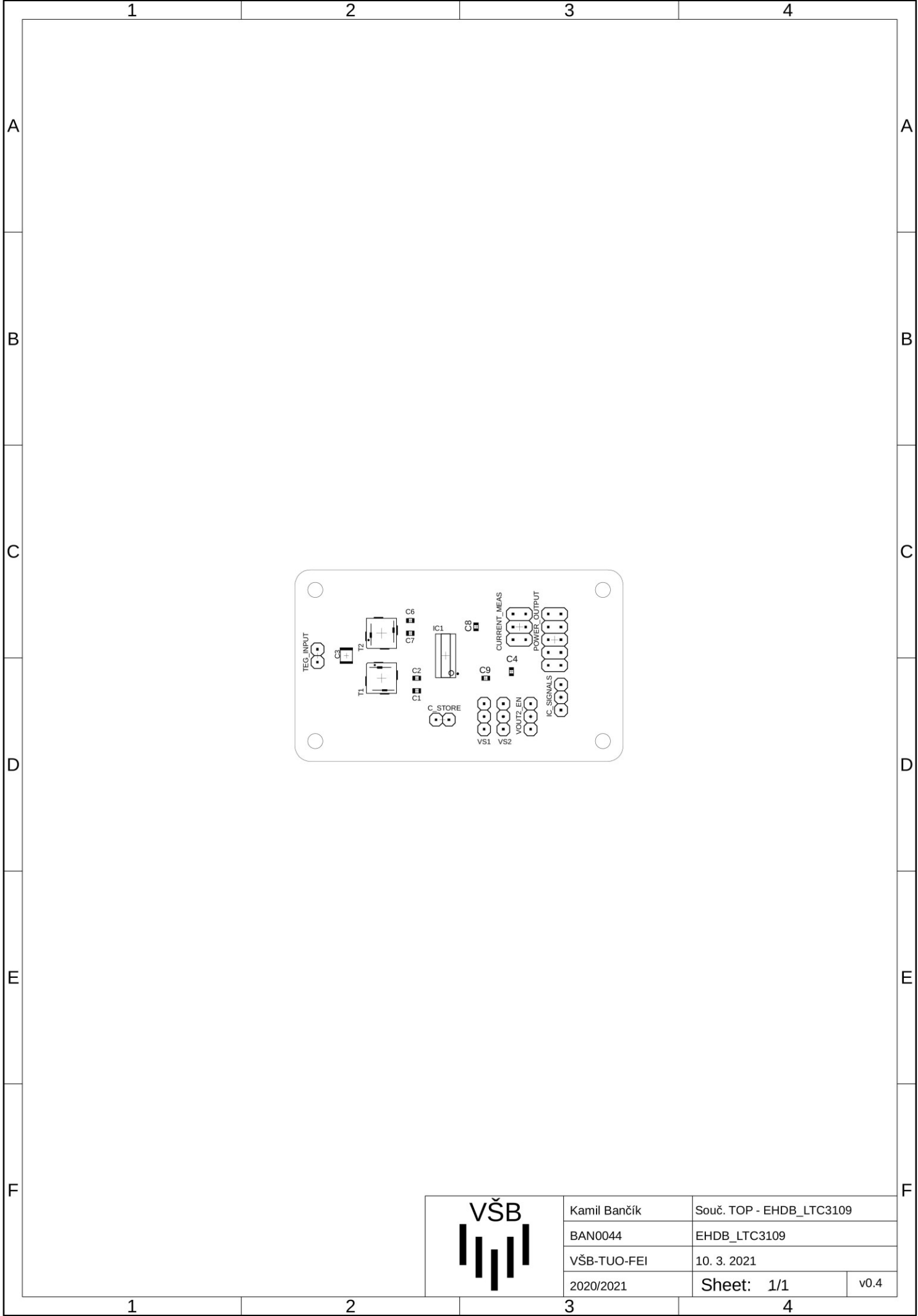
	Kamil Bančík	Motiv TOP - EHDB_LTC3109	
	BAN0044	EHDB_LTC3109	
	VŠB-TUO-FEI	10. 3. 2021	
	2020/2021	Sheet: 1/1	v0.4

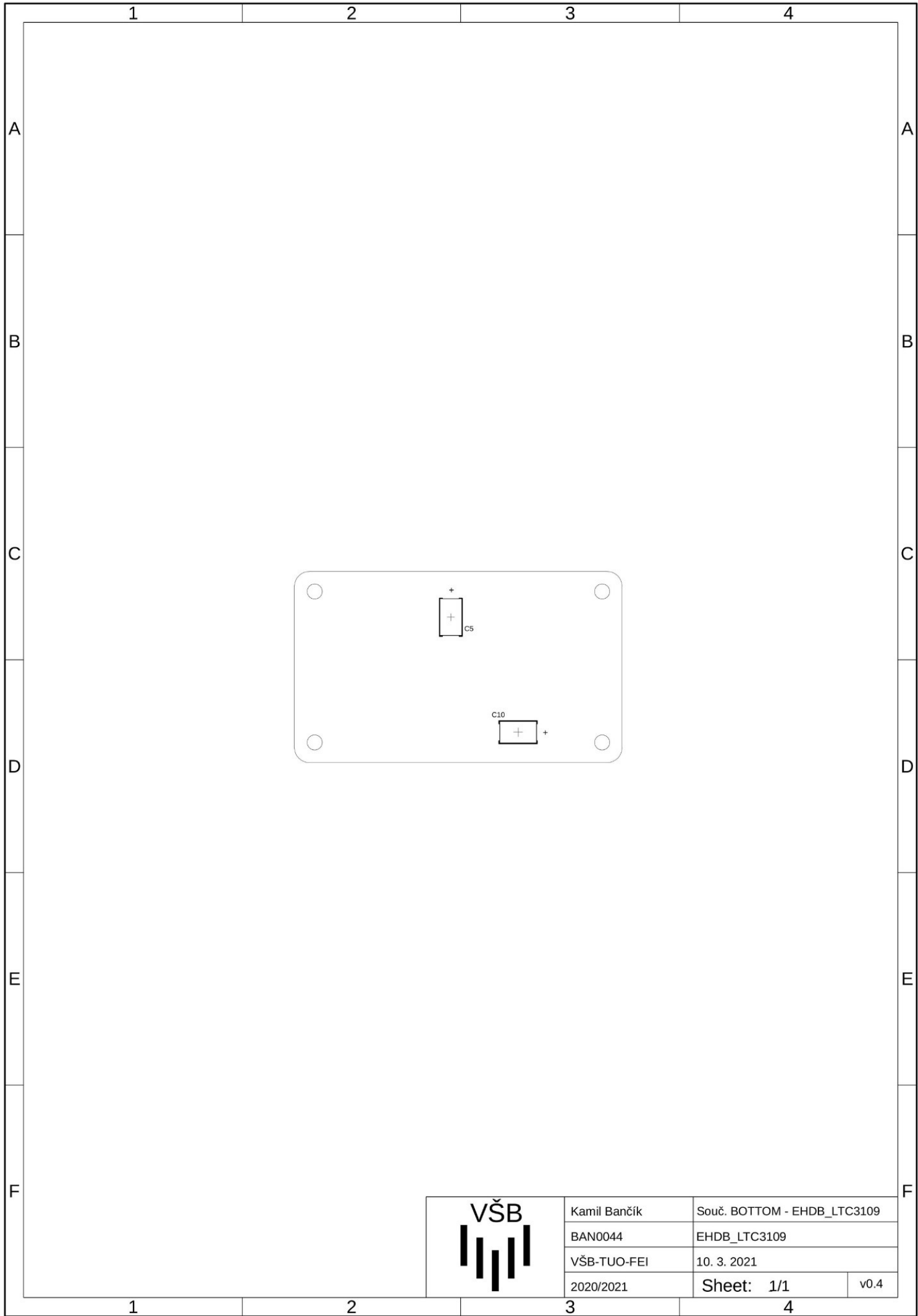


	Kamil Bančík	Motiv BOTTOM - EHDB_LTC3109	
	BAN0044	EHDB_LTC3109	
	VŠB-TUO-FEI	10. 3. 2021	
	2020/2021	Sheet: 1/1	v0.4



	Kamil Bančík	Potisk TOP - EHDB_LTC3109
	BAN0044	EHDB_LTC3109
	VŠB-TUO-FEI	10. 3. 2021
	2020/2021	Sheet: 1/1 v0.4







Tabulka přílohy i – seznam součástek DPS – EHDB\_LTC3109

Součástka	Hodnota	Obj. číslo produktu	Provedení	Počet
C_STORE, TEG_INPUT	2,54 mm header, THT	MC34739	1X02	2
IC_SIGNALS, VOUT2_EN, VS1, VS2	2,54 mm header, THT	MC34739	1X03	4
CURRENT_MEAS	2,54 mm header, THT	MC34739	2X03	1
POWER_OUTPUT	2,54 mm header, THT	MC34739	2X05	1
C4	0,1 $\mu$ F/16 V	C0606C104K4RECTU	C0603	1
C1, C6	1 nF/ 50 V	C1608X7R1H102K080AE	C0603	2
C9	1 $\mu$ F/25 V	C0603C105K3PAK7411	C0603	1
C8	2,2 $\mu$ F/16 V	C1608X5R1C225M080AB	C0603	1
C5, C10	220 $\mu$ F/6,3 V	WE-875015119006	WCAP-PHGP	2
C2, C7	470 pF/50 V	C0603C471K5RAC	C0603	2
C3	47 $\mu$ F/10 V	C1210C476M8PACTU	C1210K	1
T1, T2	7 $\mu$ H/70000 $\mu$ H	WE-74488540070	WE-EHPI_5838	2
IC1	LTC3109IGN	LTC3109IGN#PBF	20SSOP	1